

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

ANDRÉ LUIZ DE OLIVEIRA E SILVA

AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE ACIONAMENTOS APLICADAS A  
TRANSPORTADORES DE CORREIA

NITERÓI, RJ

2019

ANDRÉ LUIZ DE OLIVEIRA E SILVA  
MATRÍCULA: M054.217.002

AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE ACIONAMENTOS APLICADAS A  
TRANSPORTADORES DE CORREIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Bruno Wanderley França, DSc.

Coorientador: Prof. Márcio Zamboti Fortes, Dr.

Niterói, RJ

2019

S586a Silva, André Luiz de Oliveira e  
Avaliação de tecnologias de acionamentos aplicadas a  
transportadores de correia / André Luiz de Oliveira e Silva ;  
Bruno Wanderley França, orientador ; Marcio Zamboti Fortes,  
coorientador. Niterói, 2019.  
124 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2019.m.08791028701>

1. Acionamento eletrônico. 2. Transporte de minério. 3.  
Produção intelectual. I. França, Bruno Wanderley,  
orientador. II. Fortes, Marcio Zamboti, coorientador. III.  
Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV.  
Título.


CDD -

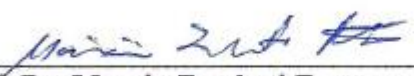
ANDRÉ LUIZ DE OLIVEIRA E SILVA

AVALIAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS DE ACIONAMENTOS APLICADAS A  
TRANSPORTADORES DE CORREIA


Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

BANCA EXAMINADORA

  
**Prof. Dr. Bruno Wanderley França** - Orientador  
Universidade Federal Fluminense - UFF

  
**Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes** - coorientador  
Universidade Federal Fluminense - UFF

  
**Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias**  
Universidade Federal Fluminense - UFF

  
**Prof. Dr. Emanuel Leonardus van Emmerik**  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Niterói, RJ

2019

Este trabalho é dedicado à minha esposa Paula Lima e a minha filha Maria Beatriz, por terem me dado apoio em todos os momentos para a conclusão desta etapa.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por Vossa imensa misericórdia, amor, fidelidade e por ter me dado forças para concluir esta etapa.

A intercessão da Virgem Santíssima.

A minha esposa Paula Lima pelo seu incentivo, amor e apoio em todos os momentos.

Aos meu pais, por todo esforço realizado para me dar uma educação de qualidade e me ensinado a lutar pelos meus sonhos.

Ao meu sogro e minha sogra pelo apoio, cuidando da minha filha para que pudesse concluir esta etapa.

Ao meu orientador Prof. Bruno França, pelo grande apoio prestado em todos os momentos, pela sua paciência e seus ensinamentos.

Ao meu coorientador Prof. Márcio Zamboti, por ter acreditado em mim desde o início e ter me dado esta grande oportunidade, pela sua paciência e seus ensinamentos.

Ao grande amigo e Prof. Edísio Junior, por ser o grande incentivador e apoiador em todos os momentos desta etapa.

Aos amigos de classe Larissa Gouveia, Henrique Koji, Pablo Brito, Mário Motta e Rodrigo Machado por todos os momentos vividos de alegria, dificuldades e ensinamentos.

“Nada existe de tão difícil que não seja vencível.”

Júlio Cesar

“Sempre há uma saída para qualquer problema, por mais complexo e difícil que nos pareça.”

C. Torres Pastorino

“O gênio consiste em um por cento de inspiração e noventa e nove por cento de transpiração.”

Thomas Edison

“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso.”

Albert Einstein

## RESUMO

A busca pela eficiência energética e a qualidade de energia tem sido motivo de muitas pesquisas. Alguns fatores motivam tal busca como, por exemplo, o custo elevado da tarifa da energia elétrica, a necessidade do uso racional dessa energia e a alta competitividade entre as indústrias. O transportador de correia é um dos equipamentos mais utilizados no setor da mineração devido sua capacidade de movimentar cargas de forma rápida, ágil e econômica, tornando-o um equipamento de transporte de alta eficiência. Esta dissertação apresenta uma avaliação, em face da eficiência energética e da qualidade da energia elétrica, quando da aplicação de tecnologias de acionamentos à transportadores de correia de um terminal de exportação de minério de ferro. Portanto, neste trabalho, apresenta-se uma análise da viabilidade técnica da aplicação da ação combinada do reostato de partida e do *soft-starter*, com enfoque no impacto na qualidade da energia durante o seu acionamento. Além disso, avalia-se o benefício do uso de um compensador estático (STATCOM) como forma de regulação da tensão de alimentação do transportador. As avaliações técnicas são realizadas através da modelagem e simulação do sistema alimentador do transportador no *software* de simulações de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC. Esse modelo é validado através da comparação com oscilografias do sistema real estudado.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética, Qualidade de Energia, Transportador de Correias, Motores de Indução, Acionamentos de motores, Conversores estáticos de potência.



## ABSTRACT

The pursuit of energy efficiency and energy quality has been the subject of many types of research. Such pursuit is pushed by some issues, such as the high cost of the electricity and the need for its rational use, and the industry's high competitiveness. The belt conveyor is one of the most used equipments in the mining industry because of its ability to move loads quickly and economically, making it a high-efficiency conveyor equipment. This dissertation presents an evaluation of new drive technologies applied to belt conveyors of an iron ore export terminal. Therefore, this work presents an analysis of the technical feasibility of applying the combined action of the starter rheostat and the soft-starter, focusing on the impact on power quality during its activation. Moreover, the operational benefits of a static synchronous compensator (STATCOM) for voltage regulation are discussed. The feeding system is modeled and simulated to carry out the analysis through the PSCAD/EMTDC software. Acquisitions from the real system are used to validate the simulated model.

**Keywords:** Energy Efficiency, Power Quality, Belt Conveyor, Induction Motors, Motor Drives, Static power converters.

## SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1	Motivação.....	4
1.2	Objetivos .....	5
1.3	Principais contribuições .....	6
1.4	Estrutura do documento .....	6
2	Fundamentação teórica.....	8
2.1	Sistemas Motrizes .....	8
2.2	Motores Elétricos .....	8
2.3	Características Construtivas .....	11
2.4	Escorregamento.....	13
2.5	Perdas .....	15
2.6	Rendimento .....	20
2.7	Técnicas de Acionamentos.....	20
2.7.1	Técnicas de Acionamento por Dispositivos Mecânicos.....	21
2.7.2	Técnicas de Acionamento por Dispositivos Eletromecânicos Convencionais.....	21
2.7.3	Técnicas de Acionamento por Dispositivos Eletroeletrônicos.....	22
2.8	Soft-starter.....	22
2.8.1	Princípio de Funcionamento.....	23
2.8.2	Configurações de Operação.....	26
2.9	STATCOM.....	29
2.9.1	Princípio de Funcionamento.....	30
2.10	Qualidade de energia elétrica .....	32
2.10.1	Tensão em regime permanente.....	33
2.10.2	Desequilíbrio de tensão .....	34
2.10.3	Variação de tensão de curta duração .....	35
2.10.4	Fator de potência .....	36
2.10.5	Variação de frequência.....	37
3	Descrição do Caso.....	38
3.1	Medições em Campo.....	43
3.2	Avaliação do desequilíbrio de tensão.....	44
3.3	Avaliação do perfil de tensão eficaz .....	48
3.4	Avaliação da variação da frequência.....	51
4	Modelagem e validação.....	53
4.1	Motor de indução de rotor bobinado e resistência rotórica.....	53
4.2	Transformador.....	55
4.3	Cabos.....	56

4.4	Validação e análise do caso base .....	57
5	Aplicações das soluções .....	67
5.1	Aplicação do <i>Soft-starter</i> .....	67
5.1.1	Aplicação da ação combinada soft-starter e banco de resistência.....	71
5.1.2	Avaliação da ação combinada soft-starter e banco de resistência 50% de carga .....	72
5.1.3	Avaliação da ação combinada <i>soft-starter</i> e banco de resistência 75% de carga.....	75
5.1.4	Avaliação da ação combinada <i>soft-starter</i> e banco de resistência 100% de carga.....	78
5.1.5	Avaliação da aplicação da ação combinada <i>soft-starter</i> e banco de resistência na barra de 4,16 kV .....	81
5.2	Aplicação do STATCOM ideal.....	89
5.2.1	Aplicação da ação combinada do STATCOM, <i>soft-starter</i> e banco de resistência ...	95
6	Conclusão e trabalhos futuros .....	101
6.1	Conclusão.....	101
6.2	Trabalhos Futuros .....	102
	Bibliografia.....	104

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Geração de energia elétrica por fonte [3].	2
Figura 2 - Consumo nacional de energia elétrica por setor [3].	2
Figura 3 - Distribuição do consumo de energia elétrica por uso final na indústria [4].	3
Figura 4 - Evolução dos motores elétricos [12].	8
Figura 5 - Tipos de motores elétricos [13].	9
Figura 6 - Variação da resistência do estator para motores [15].	10
Figura 7 - Motor de indução trifásico de rotor bobinado [13].	12
Figura 8 - Família de curvas conjugado x velocidade [14].	14
Figura 9 - Distribuição das potências e perdas em uma máquina de indução [21].	15
Figura 10 - Circuito de potência do <i>soft-starter</i> [27].	23
Figura 11 - Controlador de tensão CA monofásico [28].	23
Figura 12 - Formas de onda da tensão instantânea [29].	24
Figura 13 - Curva torque versus velocidade para valores de disparo [30].	26
Figura 14 - Rampa de aceleração do motor [32].	27
Figura 15 - Rampa de desaceleração do motor [32].	27
Figura 16 - Partida <i>Kick Start</i> [32].	28
Figura 17 - Partida por limitação de corrente [32].	28
Figura 18 - Partida por economia de energia [32].	29
Figura 19 - Diagrama de blocos do STATCOM [33].	29
Figura 20 - Representação no tempo das tensões desequilibradas [39].	34
Figura 21 - <i>Layout</i> dos equipamentos do terminal.	38
Figura 22 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição elétrica de correias transportadoras.	40
Figura 23 - Diagrama unifilar do acionamento analisado.	41
Figura 24 - Diagrama de comando de partida por resistência rotórica.	42
Figura 25 - Fluke 435 <i>Series II Power Quality and Energy Analyzer</i> [40].	44
Figura 26 - Número de eventos para cada valor da tensão VAB no período analisado.	45
Figura 27 - Número de eventos para cada valor da tensão VBC no período analisado.	45
Figura 28 - Número de eventos para cada valor da tensão VCA no período analisado.	46
Figura 29 - Resumo das informações da tensão VAB durante o período analisado.	47
Figura 30 - Resumo das informações da tensão VBC durante o período analisado.	47
Figura 31 - Resumo das informações da tensão VCA durante o período analisado.	48

Figura 32 - Curva da tensão VAB durante todo o período de medição.....	49
Figura 33 - Curva da tensão VBC durante todo o período de medição.....	49
Figura 34 - Curva da tensão VCA durante todo o período de medição.....	50
Figura 35 - Valores extremos inferiores da tensão VAB.....	51
Figura 36 - Valores extremos inferiores da tensão VBC.....	51
Figura 37 - Valores extremos inferiores da tensão VCA.....	51
Figura 38 - Gráfico da frequência.....	52
Figura 39 - Figura das tabelas de parâmetros do PSCAD/EMTDC.....	53
Figura 40 - Modelagem do motor com partida rotórica no PSCAD/EMTDC. ....	54
Figura 41 - Modelagem do bloco de controle das resistências externas no PSCAD/EMTDC.	54
Figura 42 - Modelo de transformador com comutador de <i>tap</i> e bloco de controle. ....	55
Figura 43 - Modelo de transformador sem comutador de derivação em carga. ....	56
Figura 44 - Modelo dos cabos .....	57
Figura 45 - Diagrama unifilar do sistema elétrico do caso base.....	58
Figura 46 - Modelagem do sistema no PSCAD/EMTDC. ....	60
Figura 47 - Eventos de acionamentos das máquinas e perfis de carga.....	61
Figura 48 - Curva de tensão da barra durante período de medição. ....	62
Figura 49 - Curva de corrente do motor durante período de medição.....	63
Figura 50 - Curva de tensão da barra e corrente do motor simulação PSCAD/EMTDC.....	64
Figura 51 - Comutação do tap do transformador principal PSCAD/EMTDC. ....	65
Figura 52 - Velocidade do motor durante a partida no PSCAD/EMTDC.....	65
Figura 53 - Modelo <i>soft-starter</i> simulado no PSCAD/EMTDC. ....	67
Figura 54 - Curva de velocidade, torque, corrente e tensão do motor com <i>soft-starter</i> . ....	68
Figura 55 - Curva de velocidade, torque, corrente e tensão do motor com partida direta.....	70
Figura 56 - Modelo ação combinada <i>soft-starter</i> e banco de resistência. ....	71
Figura 57 - Perfil de corrente partida rotórica com 50% de carga. ....	73
Figura 58 - Perfil de corrente ação combinada com 50% de carga. ....	73
Figura 59 - Rampa de aceleração partida rotórica com 50% da carga. ....	74
Figura 60 - Rampa de aceleração ação combinada com 50% da carga. ....	74
Figura 61 - Zoom na rampa de aceleração partida rotórica com 50% da carga. ....	75
Figura 62 - Zoom na rampa de aceleração ação combinada com 50% da carga. ....	75
Figura 63 - Perfil de corrente partida rotórica com 75% de carga. ....	76
Figura 64 - Perfil de corrente ação combinada com 75% de carga. ....	76
Figura 65 - Rampa de aceleração partida rotórica com 75% da carga. ....	77

Figura 66 - Rampa de aceleração ação combinada com 75% da carga. ....	77
Figura 67 - Zoom na rampa de aceleração partida rotórica com 75% da carga. ....	78
Figura 68 - Zoom na rampa de aceleração ação combinada com 75% da carga. ....	78
Figura 69 - Perfil de corrente partida rotórica com 100% de carga. ....	79
Figura 70 - Perfil de corrente ação combinada com 100% de carga. ....	79
Figura 71 - Rampa de aceleração partida rotórica com 100% da carga. ....	80
Figura 72 - Rampa de aceleração ação combinada com 100% da carga. ....	80
Figura 73 - Zoom na rampa de aceleração partida rotórica com 100% da carga. ....	81
Figura 74 - Zoom na rampa de aceleração ação combinada com 100% da carga. ....	81
Figura 75 - Perfil de tensão da barra de 4.16 kV com partida rotórica. ....	82
Figura 76 - Perfil de tensão da barra de 4.16 kV com ação combinada soft-starter e banco de resistência. ....	83
Figura 77 - Afundamento de tensão na barra 4,16 kV caso base. ....	83
Figura 78 - Afundamento de tensão na barra 4,16 kV ação combinada. ....	84
Figura 79 - Comutação do <i>tap</i> transformador na barra com ação combinada. ....	85
Figura 80 - Perfil de corrente do motor caso base. ....	85
Figura 81 - Perfil de corrente do motor com ação combinada do <i>soft-starter</i> e banco de resistência. ....	86
Figura 82 - Rampa de aceleração no caso base. ....	87
Figura 83 - Rampa de aceleração do motor com ação combinada. ....	87
Figura 84 - Zoom na rampa de aceleração do motor no caso base. ....	88
Figura 85 - Zoom na rampa de aceleração do motor com ação combinada. ....	88
Figura 86 - Diagrama de controle do STATCOM modelado. ....	89
Figura 87 - Modelagem do sistema com STATCOM ideal. ....	90
Figura 88 - Perfil de tensão da barra de 4,16 kV com partida rotórica. ....	91
Figura 89 - Perfil de tensão da barra de 4,16 kV com STATCOM ideal. ....	91
Figura 90 - Oscilação de tensão da barra de 4.16 kV saída abrupta dos motores. ....	92
Figura 91 - Operação do STATCOM ideal. ....	93
Figura 92 - Operação do comutador de <i>tap</i> no caso base. ....	93
Figura 93 - Operação do comutador de <i>tap</i> com implementação do STATCOM ideal. ....	94
Figura 94 - Perfil de corrente do motor caso base. ....	94
Figura 95 - Perfil de corrente do motor com implementação do STATCOM ideal. ....	95
Figura 96 - Perfil de tensão da barra de 4,16 kV com partida rotórica. ....	96

Figura 97 - Perfil de tensão da barra de 4,16 kV com ação combinada do STATCOM ideal, <i>soft-starter</i> e banco de resistência. ....	96
Figura 98 - Oscilação de tensão da barra de 4.16 kV saída abrupta dos motores com ação combinada do STATCOM ideal, <i>soft-starter</i> e banco de resistência. ....	97
Figura 99 - Operação do comutador de <i>tap</i> no caso base. ....	98
Figura 100 - Operação do comutador de <i>tap</i> com implementação da ação combinada do STATCOM ideal, <i>soft-starter</i> e banco de resistência. ....	99
Figura 101 - Perfil de corrente do motor caso base. ....	99
Figura 102 - Perfil de corrente do motor com implementação da ação combinada do STATCOM ideal, <i>soft-starter</i> e banco de resistência. ....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os motores de indução de rotor bobinado e de gaiola [13]......	11
Tabela 2 - Fenômenos de QEE definidos no módulo 8 do PRODIST [38]......	33
Tabela 3 - Critérios para classificação de tensão em regime permanente em pontos de conexão com tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV [38]......	33
Tabela 4 - Limites para os desequilíbrios de tensão [38]. .....	35
Tabela 5 - Classificação das variações de tensão de curta duração [38]. .....	35
Tabela 6 - Tempo de operação de cada estágio e valor ôhmico de cada resistência. ....	42
Tabela 7 - Dados de placa do MITRB.....	43
Tabela 8 - Dados dos transformadores. ....	55
Tabela 9 - Dados dos cabos elétricos modelados. ....	56
Tabela 10 - Momento de inércia dos motores e cargas. ....	58
Tabela 11 - Configuração do ângulo de disparo dos tiristores. ....	72



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BEN	Balanço Energético Nacional
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
MITRB	Motor de Indução Trifásico de Rotor Bobinado
MITGE	Motor de Indução Trifásico de Gaiola de Esquilo
MIT	Motor de Indução Trifásico
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
STATCOM	<i>STATic synchronous COMpensator</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
DHT	Distorção Harmônica Total
$DIT_h\%$	Distorção Harmônica Individual de Tensão de Ordem h
DTT%	Distorção Harmônica Total de Tensão
DTT95%	Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas
FP	Fator de Potência
FD	Fator de Desequilíbrio
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

## 1. INTRODUÇÃO

As novas exigências dos mercados consumidores, a escassez dos recursos energéticos, o crescimento da economia global e o aumento da competitividade, fizeram com que as indústrias buscassem a otimização de seus investimentos, redução dos impactos ambientais e o aumento da produtividade.

Junto ao crescimento econômico nacional, produtividade intensa, instalações industriais cada vez maiores e a reestruturação do setor elétrico brasileiro, em 2001, surge a crise energética, denunciando a falta de planejamento e de investimento no setor por parte do governo. Diante desse contexto e do momento econômico nacional, o setor elétrico enfrentou momento de estagnação desde a década de 1990 [1].

A partir da crise desencadeada, vem acontecendo de forma mais significativa o incentivo às ações específicas para reduzir o desperdício de energia elétrica em todo o país. Dentre as medidas adotadas para a racionalização e utilização eficiente da energia elétrica é a Lei de Eficiência Energética 10.295/2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia visando a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente [2]. Assim sendo, o setor elétrico brasileiro passou por uma revisão na forma do uso racional de seus recursos tanto na indústria como no comércio e nas residências englobando uma campanha nacional em que todos os setores da sociedade estavam envolvidos.

O Balanço Energético Nacional (BEN), publicação anual realizada pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), que tem a finalidade de apresentar a contabilização referente ao consumo e a oferta de energia no Brasil, divulgou no BEN 2018 [3], a oferta interna energia elétrica no Brasil no ano de 2017 atingiu 624,3 Terawatt-hora (TWh), um crescimento de 1,6% na geração total em relação ao ano anterior. A Figura 1 apresenta a geração de energia elétrica por fonte no país.

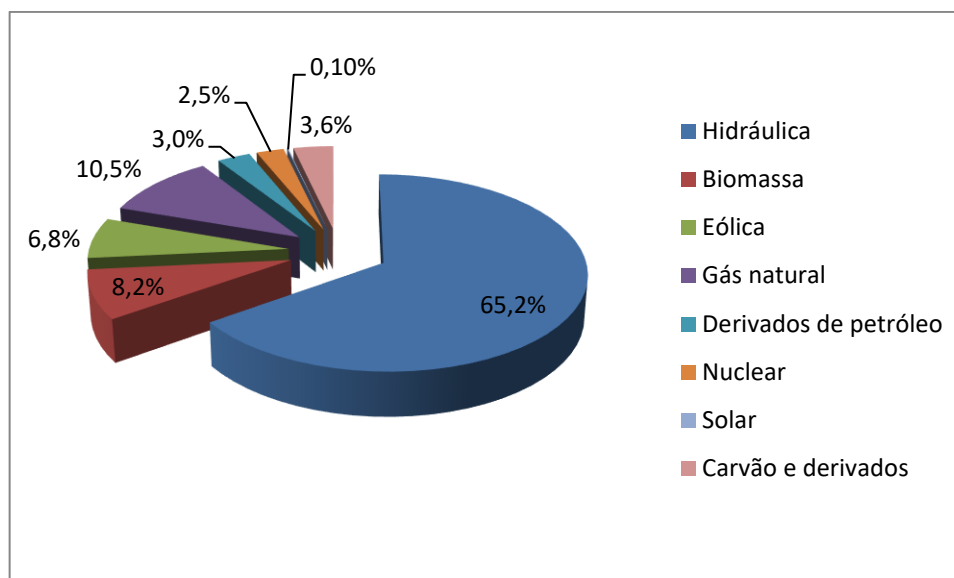


Figura 1 - Geração de energia elétrica por fonte [3].

De acordo com [3], o consumo final de energia elétrica no país foi de 526,2 TWh, um aumento de 0,9% em comparação com o ano anterior, destaque para o consumo de eletricidade na indústria de 31,8%, que foi o maior em relação aos demais setores. A Figura 2 apresenta o consumo de energia elétrica no ano de 2017 por setor.

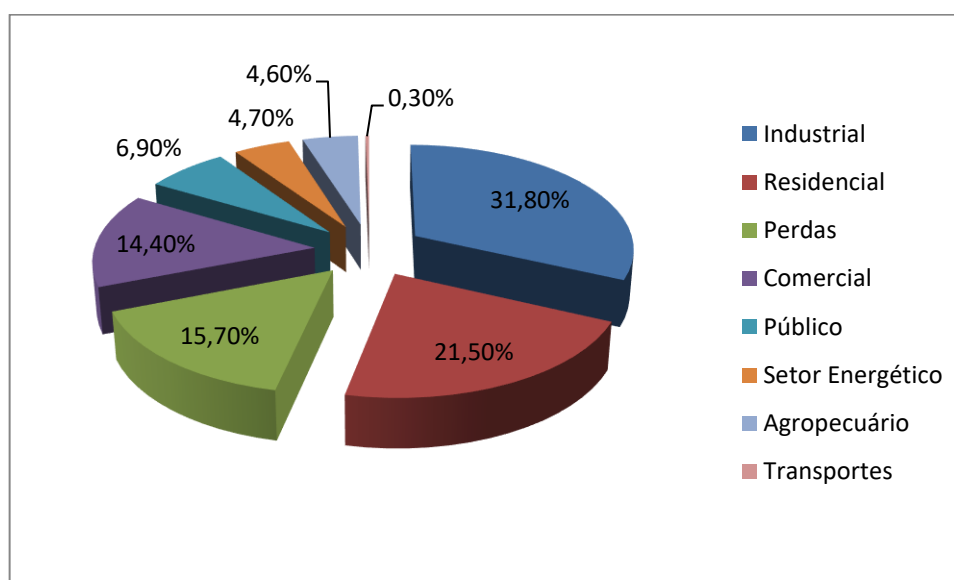


Figura 2 - Consumo nacional de energia elétrica por setor [3].

A indústria nacional é o setor que demanda maior necessidade de energia elétrica. Em consequência disso, é também o responsável por grande parcela de desperdício da mesma. O uso eficiente de energia, a diminuição de gastos e de possíveis desperdícios tornam-se alvo de grande investimento por parte dos pesquisadores, que passam a buscar novas técnicas e

propostas baseadas na sustentabilidade, no aumento da produtividade e da eficiência. Uma das soluções apontadas para a conservação de energia foi a implantação de programas de eficiência energética.

Em [4], foi realizada uma pesquisa no setor industrial em relação a distribuição do consumo de energia elétrica por uso final, em que houve destaque para a força motriz, que é o principal consumidor com 68,3%, conforme apresentada na Figura 3.

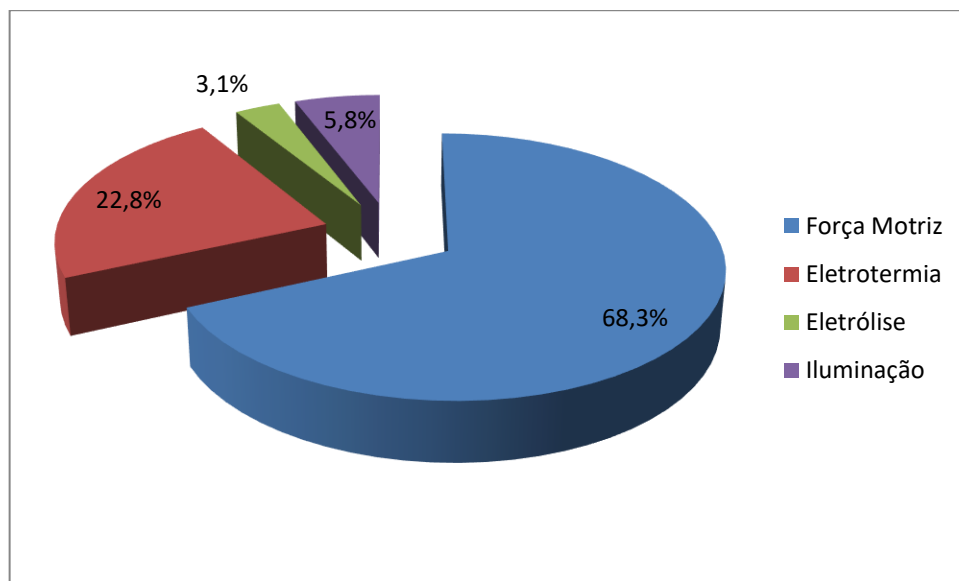


Figura 3 - Distribuição do consumo de energia elétrica por uso final na indústria [4].

Os motores elétricos são as principais cargas dentro do setor industrial, portanto devem receber uma atenção especial em programas de eficiência energética e qualidade de energia. Estudos indicam que este motor pode ser considerado o mais importante uso final de energia elétrica do país, chegando a ser o responsável por processar mais de 30% da energia elétrica do Brasil [5].

O manuseio e movimentação de materiais desempenham um papel fundamental na operacionalização do setor industrial, dando ênfase aos transportadores de correia que são amplamente utilizados no setor da mineração. A sua alta eficiência no manuseio de materiais a granel seco e no transporte de pequenas, médias e longas distâncias em relação a outros métodos de transporte é o diferencial deste equipamento. Os transportadores de correia estão sendo empregados para formar as partes mais importantes dos sistemas de manuseio de materiais devido à sua alta eficiência de transporte [6]. O custo com eletricidade forma uma grande parte do custo operacional dos sistemas de transportador de correias, que pode ser de até 40%, enquanto os 60% restantes são devidos a custos operacionais e manutenção [7]. Portanto, é

significativo melhorar a eficiência energética dos transportadores de correia para reduzir o consumo de energia ou o custo de energia do manuseio de materiais, que é um dos focos de desenvolvimento da tecnologia de transportadores de correia [8].

O sistema de partida suave de motores também é foco de diversas pesquisas no âmbito da eficiência energética e qualidade de energia. Conforme [9], o *soft-starter* reduz também a tensão na alimentação elétrica, devido às altas correntes de partida, que atendem aos requisitos da concessionária para partida de tensão reduzida e elimina as condições de queda de tensão e dissipação de energia. Os *soft-starters* tiristorizados são baratos, simples, confiáveis e ocupam menos volume e, portanto, seu uso é uma solução viável para o problema de partida de motores de média e alta tensão [10].

O *STATIC synchronous COMPensator* (STATCOM), é um dispositivo bastante usado para melhorar o controle de tensão transitória e eliminação dos afundamentos de tensão. Segundo [11], o STATCOM reduz a magnitude e duração da queda de tensão, estabilização precoce da corrente do motor e aumento do torque. O resultado é a melhoria na qualidade da energia e a redução na energia consumida pelo motor durante o momento da partida, o que acaba resultando em uma melhor conservação da energia.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Considerando os motores de indução de rotor bobinado, um dos tipos de motores mais utilizados no processo industrial do terminal de exportação de minério de ferro pesquisado, a busca por novas alternativas para melhoria do desempenho durante a partida e em regime permanente dos acionamentos dos transportadores de correia é uma proposta atrativa, onde se deve avaliar a sua viabilidade técnica e visando os aspectos de eficiência energética e a qualidade de energia elétrica. A motivação desta pesquisa é a de disponibilizar uma análise dos impactos na qualidade de energia em transitório de partida e na regulação de tensão em regime permanente ocasionados pelos acionamentos com partida rotórica e apresentar soluções para mitigação ou eliminação destes problemas.

Os acionamentos dos transportadores de correia do terminal de exportação de minério de ferro pesquisado, utiliza uma técnica de acionamento já ultrapassada, porém devido as

peculiaridades dos transportadores, a substituição desta técnica de acionamento não é uma tarefa fácil.

A utilização do *soft-starter* como técnica de acionamento para os transportadores de correia é uma solução atrativa nos aspectos econômico e de qualidade de energia, porém para acionamento de cargas com altas inércias e conjugado constante não é tão eficaz. Portanto a utilização da ação combinada do *soft-starter* e do banco de resistência como técnica de acionamento se faz necessário, mantendo as características originais de projeto.

A pesquisa será realizada em uma empresa do setor de mineração, especificamente em um terminal de exportação de minério de ferro localizado no estado do Rio de Janeiro, onde grande parte de seus equipamentos para movimentação de material são compostos por transportadores de correia.

## **1.2 OBJETIVOS**

O principal objetivo deste estudo é apresentar uma avaliação comparativa entre a técnica de acionamento existente e a implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência nos sistemas de transportadores de correia em um terminal de exportação de minério de ferro. É proposto um modelo de análise e verificação da viabilidade técnica para aplicação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência como técnica de acionamento dos transportadores, visando os aspectos da eficiência energética e da qualidade de energia elétrica. Além disso, serão comparados os resultados de operação do sistema obtidos de cada um dos modelos simulados computacionalmente. Esta abordagem comparativa visa analisar o comportamento entre os mesmos a fim de verificar o acionamento mais eficiente. Outro objetivo alvo deste trabalho é estudar aplicação de um compensador síncrono estático (STATCOM) no sistema de alimentação do terminal de exportação, com vistas à melhoria da qualidade da energia frente aos transitórios de acionamento dos motores e à regulação de tensão em regime permanente.

### 1.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho avalia a possibilidade de tornar os sistemas de acionamentos de transportadores de correia mais eficientes, através da substituição da técnica comumente utilizada de acionamento de partida por resistência rotórica pela utilização da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência. Seu objetivo principal é apresentar um estudo detalhado dos impactos e benefícios que poderão ocorrer com essa substituição do ponto de vista técnico.

Assim, a proposta de utilização da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência como técnica de acionamento e a utilização do STATCOM conectado a barra de alimentação dos acionamentos apresentam, a priori, as seguintes vantagens:

- Qualidade de energia, tendo em vista que ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência possibilita realizar a partida do transportador de correia com uma rampa de aceleração suave;
- Controle de tensão da barra em regime permanente, com a implementação de um STATCOM para correção de transitório e regulação de tensão.

### 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em seis capítulos, contando com este capítulo introdutório ao tema central deste trabalho, que inclui a caracterização do problema e sua contextualização, bem como objetivos, motivações e contribuições, além da estrutura do mesmo, que será agora apresentada, organizada de forma a proporcionar ao leitor uma sequência lógica dos tópicos apresentados:

- No Capítulo 2, "FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA", são apresentados alguns conceitos com o intuito de introduzir o leitor no tema abordado e ainda apresenta o estado da arte, os sistemas motrizes, motores elétricos, as características construtivas dos motores, escorregamento, as perdas em motores de indução, *Soft-starter*, STATCOM e por fim a qualidade de energia elétrica.
- O Capítulo 3, " DESCRIÇÃO DO CASO ", apresenta as características do transportador de correia analisado, todos os testes e medições realizadas em

campo, além da avaliação dos aspectos da eficiência energética e da qualidade de energia elétrica do acionamento aplicado no terminal.

- No Capítulo 4, "MODELAGEM E VALIDAÇÃO", mostram-se os resultados dos testes realizados com base na teoria descrita e resultados obtidos e validação do modelo, através de simulação computacional no software PSCAD/EMTDC.
- No Capítulo 5, "APLICAÇÃO DAS SOLUÇÕES", mostram-se os resultados dos testes realizados nas novas soluções aplicadas no transportador e seus comportamentos, realizados através de simulação computacional no software PSCAD/EMTDC.
- O Capítulo 6, "CONCLUSÕES", apresenta as principais conclusões deste trabalho, comentando as contribuições efetivamente alcançadas e as propostas de desenvolvimento de trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 SISTEMAS MOTRIZES

Os sistemas motrizes são as cargas mais utilizadas no setor industrial conforme abordado na parte introdutória desta dissertação. O motor de indução foi desenvolvido por Nikolas Tesla no período entre os anos de 1882 e 1887 e tem a finalidade de converter energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa. Porém, desde a sua invenção, os motores de indução sofreram diversas evoluções em relação ao seu peso/potência, conforme apresentado na Figura 4.



Figura 4 - Evolução dos motores elétricos [12].

Essa redução em seu peso e tamanho se deu em virtude de novas técnicas de isolamento e na redução da seção dos condutores, extraindo-se, contudo, uma mesma potência [12].

### 2.2 MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos são divididos em dois tipos, os motores de corrente alternada (motores CA) e de corrente contínua (motores CC), conforme apresentado na Figura 5. Os motores CC são mais utilizados para aplicações onde são necessárias uma maior precisão no controle de velocidade e torque, porém possui um custo mais elevado de aquisição e manutenção em relação aos motores CA.

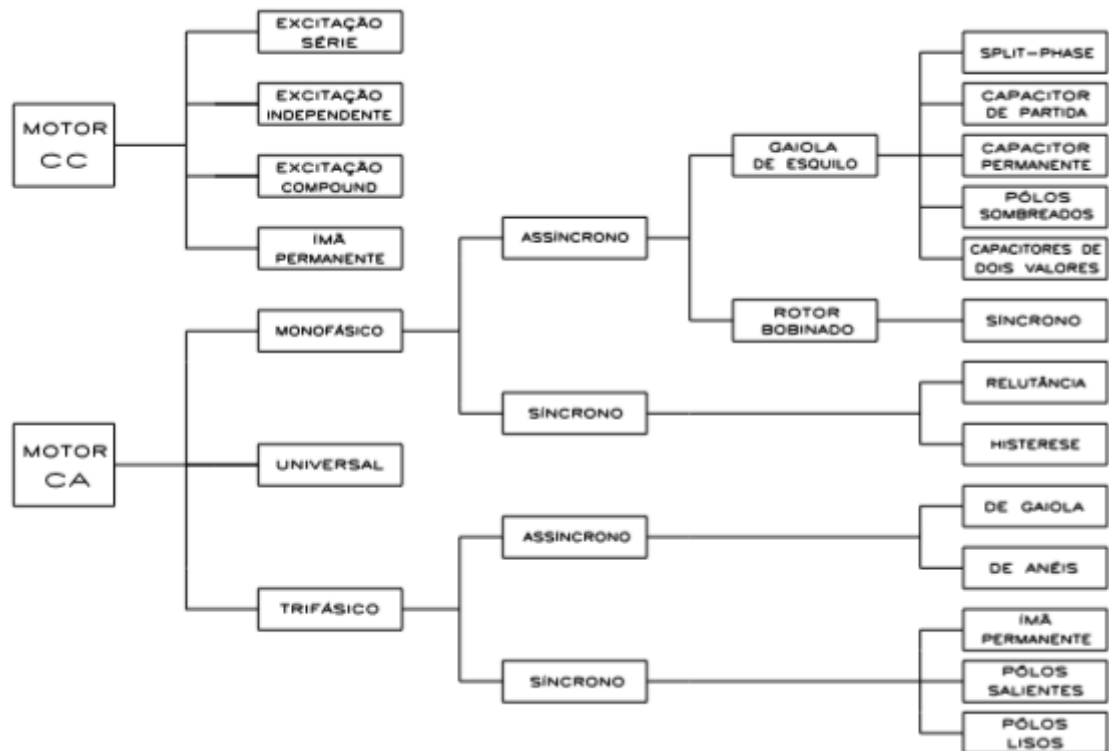


Figura 5 - Tipos de motores elétricos [13].

Os motores CA podem ser síncronos ou assíncronos. Os motores síncronos possuem velocidade constante e proporcional a frequência de alimentação, independentemente da carga aplicada no seu eixo, pois a velocidade do rotor é a mesma do campo girante.

Os motores assíncronos, também chamados de motores de indução, são os mais utilizados nas indústrias devido ao seu baixo custo de aquisição e manutenção. Nestes motores, teoricamente girando em vazio e sem perdas, o rotor tende à velocidade síncrona. Entretanto, ao ser aplicado o conjugado externo ao motor, o seu rotor diminuirá a velocidade na justa proporção necessária para que a corrente induzida pela diferença de rotação entre o campo girante e o rotor passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado externamente aplicado [14].

Os fabricantes têm procurado desenvolver máquinas de indução mais eficientes trabalhando especialmente em novos materiais e projetos modernos. O trabalho apresentado em [15], apresenta comparações entre os novos projetos através da análise dos valores das resistências do estator, rotor e magnetização de cada fabricante avaliado. A Figura 6 apresenta o comparativo dos valores das resistências do estator entre os fabricantes para uma faixa de potência onde quanto menor o valor da resistência mais eficiente é o motor.

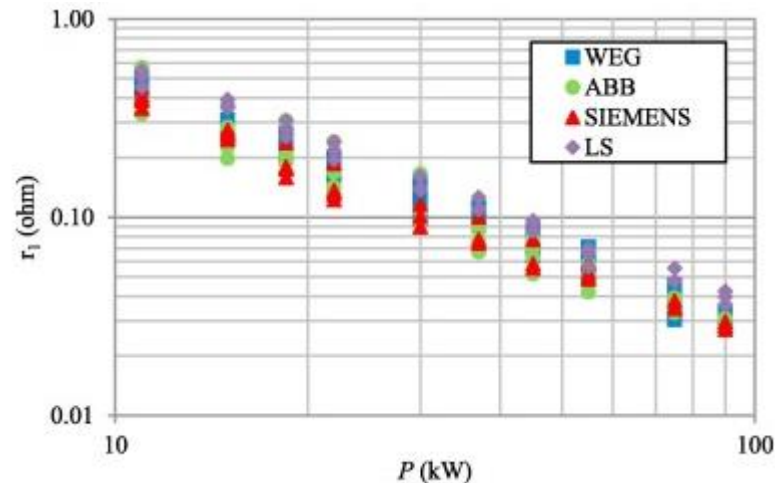


Figura 6 - Variação da resistência do estator para motores [15].

Em relação às suas características, os motores assíncronos são subdivididos em rotor de gaiola de esquilo e rotor bobinado.

Os aspectos construtivos de um motor de indução trifásico de gaiola de esquilo (MITGE), são basicamente constituídos de duas partes, uma estacionária, denominado enrolamento da armadura ou estator, que consiste em um conjunto de bobinas e pela parte rotativa, denominada enrolamento do rotor, que consiste de uma barra de condutores curto-circuitadas e encaixada em um rotor de ferro ou lâminas de aço. O enrolamento do rotor conduz a corrente elétrica que foi produzida por indução pelo enrolamento do estator, que está diretamente ligado à uma fonte de alimentação [16].

O motor de indução trifásico de rotor bobinado (MITRB), foco desta pesquisa, é bastante utilizado em aplicações para sistemas de acionamento de cargas com elevada inércia e que necessitam de um alto conjugado em baixas rotações. O rotor deste motor é constituído de um núcleo ferromagnético onde estão abrigadas as espiras do enrolamento, que são conectadas externamente através de anéis coletores com escovas a um banco de resistência.

A função do banco de resistência interligado ao rotor é de reduzir a corrente de partida por meio da variação da resistência rotórica durante o tempo de partida do motor, reduzindo os picos de corrente e realizando uma partida suave com um torque elevado. Estas resistências geralmente são ligadas em curto-circuito através de contatores à medida que o motor realiza a rampa de aceleração até a sua velocidade nominal.

A Tabela 1, apresenta um comparativo entre o MITGE e MITRB, e pode ser observado que o MITRB possui algumas desvantagens em relação ao MITGE. Estas desvantagens são em relação aos custos de aquisição e aos custos e tempo de manutenção, sendo esse devido à necessidade do banco de resistência rotórica, anéis coletores e escovas. Há ainda a necessidade de um grande espaço requerido para abrigo dos bancos de resistência. Note que, conforme [13], o conjugado máximo do MITRB pode ser maior que 180% do conjugado nominal, relativamente maior que o conjugado máximo do MITGE.

Tabela 1 - Comparativo entre os motores de indução de rotor bobinado e de gaiola [13].

	<b>Tipo de Motor</b>	
<b>Projeto</b>	<b>Motor de Indução de Rotor de Gaiola</b>	<b>Motor de Indução de Rotor Bobinado</b>
Conjugado de partida	Baixo	Alto
Corrente de partida/ corrente nominal	Alto	Baixa
Conjugado máximo	> 160% do conjugado nominal	> 180% do conjugado nominal
Rendimento	Alto	Alto
Equipamento de partida	Simple para partida direta	Relativamente simples
Equipamento de proteção	Simple	Simple
Espaço requerido	Pequeno	Banco de resistência requer um espaço grande
Manutenção	Pequeno	Nos anéis coletores, escovas e banco de resistência
Custo de Aquisição	Baixo	Alto

### 2.3 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Conforme [17], os principais componentes de um motor de indução trifásico (MIT), também podem ser divididos em componentes ativos, aqueles responsáveis pelo desempenho

eletromagnético da máquina (condutores e núcleo ferromagnético) e componentes inativos, aqueles que abrigam os componentes ativos e fazem conexão do motor com a carga, conforme apresentado na Figura 7.

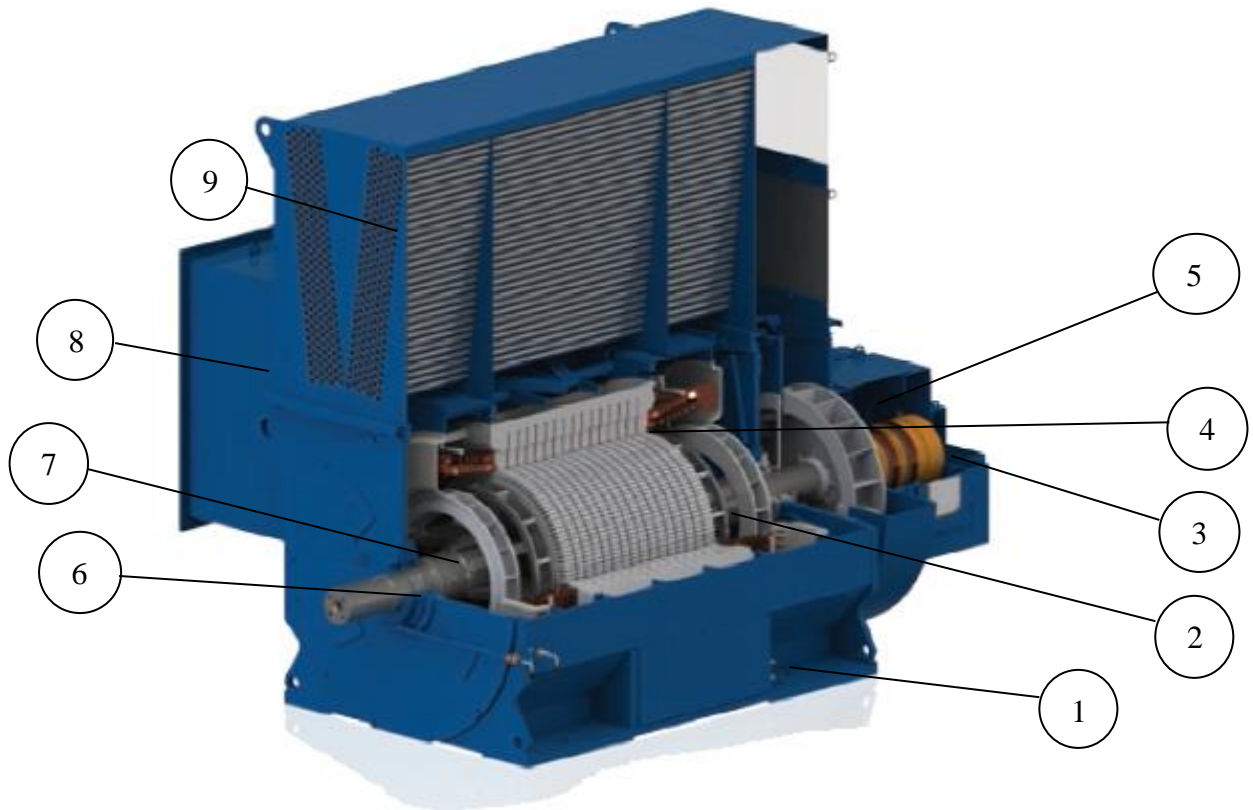


Figura 7 - Motor de indução trifásico de rotor bobinado [13].

Os componentes apresentados na Figura 7 serão descritos abaixo:

### Componentes ativos

- **Carcaça (1):** estrutura responsável em abrigar todo o conjunto, geralmente construída em alumínio, ferro fundido ou aço;
- **Rotor de Anéis (2):** responsável pela circulação do campo magnético, onde estão abrigadas as bobinas do enrolamento do rotor;
- **Anéis Coletores (3):** responsáveis pela conexão entre o circuito rotórico e as resistências externas.
- **Estator (4):** local onde são alojadas as bobinas que formam os enrolamentos, responsável pela circulação do campo magnético, geralmente constituídas de chapas de aço silício prensadas e isoladas por camadas;

## Componentes inativos

- **Ventilador (5):** responsável pela refrigeração do motor;
- **Eixo (6):** responsável pela transmissão da potência mecânica desenvolvida pelo motor;
- **Rolamento (7):** responsável pela conexão entre as partes fixas e móveis, fixadas no eixo do rotor.
- **Caixa de ligação (8):** local destinado para interligação dos terminais de ligação do motor com a rede de alimentação;
- **Trocador de Calor (9):** responsável pela refrigeração do motor;

## 2.4 ESCORREGAMENTO

A máquina de indução trifásica para produzir um campo magnético girante, de amplitude constante que gire a uma velocidade síncrona, depende de um grupo de enrolamentos iguais e individuais que estejam deslocados fisicamente no estator e que as correntes elétricas percorridas nos enrolamentos estejam defasadas. A velocidade síncrona pode ser obtida através da Equação (2.1):

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.1)$$

Onde:

$N_s$  = Velocidade síncrona do campo magnético girante, em rpm;

$f$  = Frequência da linha, em Hz;

$P$  = Número de polos produzidos.

O motor de indução também é chamado de motor assíncrono, devido a velocidade de escorregamento, que é a diferença entre as velocidades produzidas no campo magnético girante e a velocidade obtida no rotor, essa interação entre os campos resulta no torque produzido. De acordo com [18], em geral encontra-se em motores de indução escorregamentos que variam de 0,8% a 5%.

O MITRB devido a sua característica de funcionamento com inserção de resistências externas ao circuito do rotor, permite alcançar diversos valores de conjugado para uma dada

velocidade. Portanto, o motor possui diversas curvas conjugado x velocidade conforme apresentado na Figura 8.

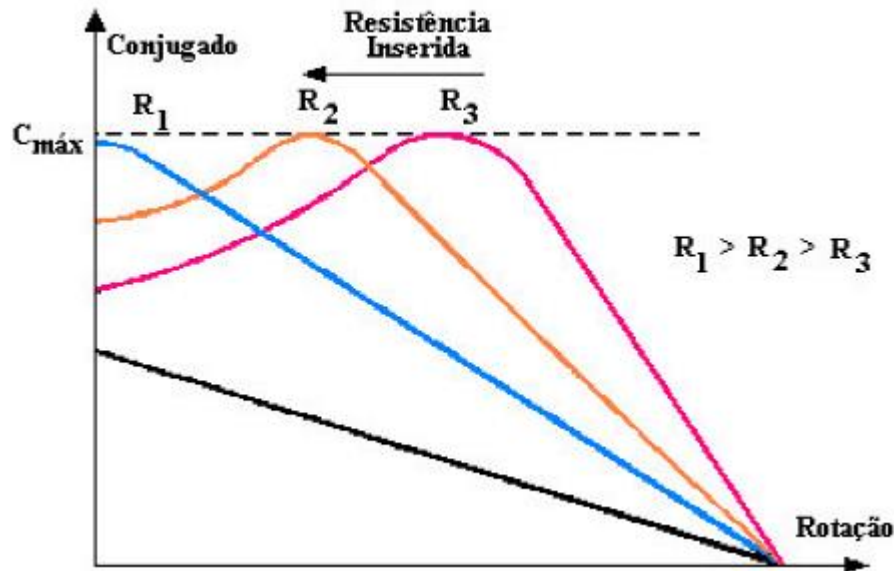


Figura 8 - Família de curvas conjugado x velocidade [14].

A inserção de uma resistência externa no rotor faz com que o motor aumente o escorregamento, provocando a variação da velocidade [13]. A velocidade de escorregamento do MITRB pode ser obtida através da Equação (2.2):

$$s = \frac{3 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{W_0 \cdot T} = \frac{P_{j2}}{W_0 \cdot T} \quad (2.2)$$

Onde:

$s$  = Escorregamento;

$R_2$  = Resistência rotórica, em  $\Omega$ ;

$I_2$  = Corrente rotórica, em A;

$W_0$  = Rotação síncrona, em rad/s;

$T$  = Torque, em Nm;

$P_{j2}$  = Perdas rotórica, em W;

O torque de um motor de indução é produzido pela interação mútua entre os campos do estator e do rotor, onde a corrente induzida no rotor aumenta proporcionalmente ao escorregamento. Nota-se, então, que o torque desenvolvido é função do escorregamento, isto é,

com o aumento da carga aplicada à máquina, aumenta-se o escorregamento e conseqüentemente o torque desenvolvido [13]. O torque pode ser obtido através da Equação (2.3):

$$T = K_t \cdot \Phi \cdot I_r \cdot \cos\theta_r \quad (2.3)$$

Onde:

$K_t$  = Constante de torque para o número de polos;

$\Phi$  = Fluxo produzido pelo polo unitário do campo magnético girante, em Wb;

$I_r$  = Componente da corrente do rotor, em A;

$\cos\theta_r$  = Fator de potência do rotor.

## 2.5 PERDAS

As máquinas de indução são equipamentos dinâmicos de conversão de energia e, por esse motivo, normalmente não são capazes de armazenar grandes quantidades de energia, portanto, não permite que toda a potência entregue à máquina seja transformada em potência de trabalho útil. De acordo com a lei da conservação de energia, a potência total recebida por uma máquina em regime permanente deve igualar a potência por ela entregue naquele instante mais suas perdas [16]. A Figura 9 ilustra as perdas em uma máquina de indução.

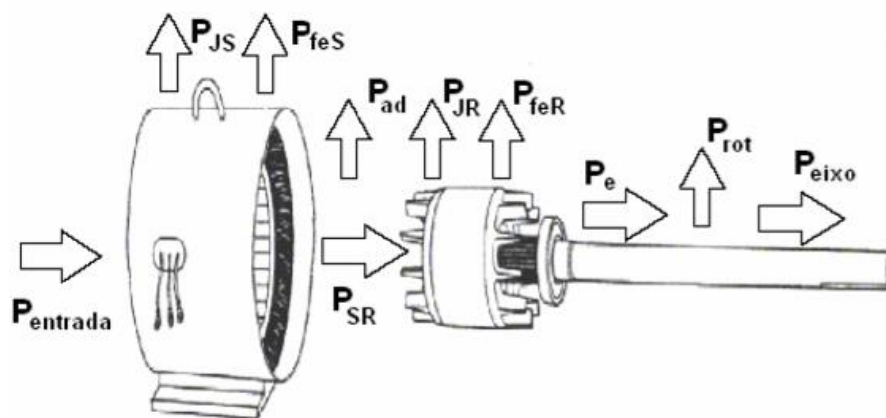


Figura 9 - Distribuição das potências e perdas em uma máquina de indução [21].

Onde:

$P_{entrada}$  – Potência de entrada;

$P_{JS}$  – Perdas Joule no estator;



$P_{feS}$  – Perdas no ferro do estator;

$P_{SR}$  – Potência estator/rotor;

$P_{ad}$  – Perdas adicionais;

$P_{JR}$  – Perdas Joule no rotor;

$P_{feR}$  – Perdas no ferro do rotor;

$P_e$  – Potência no eixo;

$P_{rot}$  – Perdas rotacionais;

$P_{eixo}$  – Potência útil no eixo;

A diferença entre a potência de entrada e a potência de saída de uma máquina é conhecido como perdas energéticas. Essas perdas não são capazes de produzir trabalho útil, somente produzem calor. A potência total recebida por uma máquina pode ser obtida pela Equação (2.4):

$$P_{in} = P_{out} + P_{perdas} \quad (2.4)$$

Onde:

$P_{in}$  = Potência total entregue à máquina, em W;

$P_{out}$  = Potência de trabalho útil, em W;

$P_{perdas}$  = Perda total produzida dentro de uma máquina, em W.

As perdas das máquinas de indução podem ser divididas em perdas elétricas e perdas rotacionais. As perdas elétricas também chamada de perdas no cobre, são ocasionadas pela circulação da corrente elétrica nos enrolamentos da máquina, onde dependem da frequência de funcionamento e da resistência do enrolamento sob condições de fluxo. A perda na excitação do estator e a perda no enrolamento do rotor são algumas das perdas elétricas encontradas nas máquinas de indução.

As perdas Joule também chamada de perdas resistivas, são as perdas relativas à circulação de corrente nos elementos condutores das máquinas. Os condutores de uma MIT estão localizados no estator e no rotor [19]. As perdas Joule no estator e rotor podem ser obtidas respectivamente através das Equações (2.5) e (2.6):

$$P_{jS} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (2.5)$$

Onde:

$P_{jS}$  = Perdas Joule no estator, em W;

$R_1$  = Resistência estatórica, em  $\Omega$ ;

$I_1$  = Corrente estatórica RMS, em A.

$$P_{jR} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (2.6)$$

Onde:

$P_{jR}$  = Perdas Joule no rotor, em W;

$R_2$  = Resistência rotórica, em  $\Omega$ ;

$I_2$  = Corrente rotórica RMS, em A.

As perdas mecânicas são as perdas associadas aos efeitos mecânicos, onde são ocasionadas diretamente pelo movimento dinâmico da máquina. Conforme [20], as perdas mecânicas consistem de atritos nas escovas e nos mancais, de ventilação, e da potência necessária para circular o ar através da máquina e sistema de ventilação.

A perda por atrito nos mancais pode ser ocasionada por diversos fatores, um dos principais é a falta de lubrificação dos mancais, porém mesmo com a lubrificação ainda há perdas. O cálculo das perdas por atritos nos mancais pode ser obtido através da Equação (2.7):

$$P_{Mec,rol} = 1,5 \cdot F \cdot \frac{v}{d_{esf}} \cdot 10^{-5} \quad (2.7)$$

Onde:

$P_{Mec,rol}$  = Perdas mecânica no rolamento;

$F$  = Força radial no rolamento, em N;

$v$  = Velocidade periférica na superfície interna do rolamento, em m/s;

$d_{esf}$  = Diâmetro médio das esferas, em m.

As perdas por atrito no rotor geralmente são ocasionadas pelo movimento entre o rotor e o estator do motor e pode ser obtido através da Equação (2.8):

$$P_{\text{atr}} = \frac{1}{32} \cdot K_{\text{rug}} \cdot C_M \cdot \pi \cdot \rho_{\text{fluido}} \cdot \omega^3 \cdot D_{2\text{ext}} \cdot l_2 \quad (2.8)$$

Onde:

$K_{\text{rug}}$  = Coeficiente de rugosidade, onde para superfície lisa  $K=1$ ;

$C_M$  = Coeficiente de torque;

$\rho_{\text{fluido}}$  = Densidade do fluido, em  $g/cm^3$ ;

$D_{2\text{ext}}$  = Diâmetro externo do rotor, em mm;

$l_2$  = Comprimento do rotor, em mm.

O ventilador desempenha um papel fundamental na refrigeração de um motor, porém seu funcionamento gera algumas perdas. Estas perdas podem ser obtidas através da Equação (2.9):

$$P_{\text{vent}} = \frac{Z_m \cdot Q^3}{\eta_e} \quad (2.9)$$

Onde:

$Z_m$  = Resistência aerodinâmica do ventilador, em  $N/m^2 \cdot s/m^6$ ;

$Q$  = Vazão de saída com o motor em operação, em  $m^3/s$ ;

$\eta_e$  = Eficiência energética do ventilador, sem unidade.

As perdas no núcleo são perdas em função do fluxo e da velocidade e podem ser divididas em perdas por histerese e perdas por correntes parasitas. Estas perdas ocorrem quando uma estrutura de ferro da armadura ou rotor gira num campo magnético, ou quando ocorre uma variação do fluxo concatenado numa estrutura de ferro [16].

As perdas por histerese são originadas pela variação da densidade de fluxo magnético no ferro, quando há a energização do enrolamento principal. Essa perda é uma medida da energia elétrica necessária para superar a retentividade do ferro no caminho do fluxo magnético [16]. As perdas por histerese podem ser obtidas pela Equação (2.10):

$$P_h = K_h \cdot B^x \cdot f \cdot V \quad (2.10)$$

Onde:

$V$  = Volume do ferro da máquina conforme variação do fluxo;

$K_h$  = Constante para o tipo de ferro utilizado;

$B^x$  = Densidade de fluxo elevada ao expoente de Steinmetz;

$f$  = Frequência, em Hz.

As perdas por correntes parasitas são originadas em todos os materiais condutivos presentes no caminho do fluxo magnético referente ao campo magnético girante ou variável. As perdas por correntes parasitas podem ser obtidas pela Equação (2.11):

$$P_e = K_1 \cdot t^2 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot V \quad (2.11)$$

Onde:

$K_1$  = Constante para correntes parasitas;

$t^2$  = Espessura do material condutivo;

$B^2$  = Densidade de fluxo;

$f^2$  = Frequência, em Hz.

$V$  = Volume do material conforme variação do fluxo;

Existem ainda as perdas suplementares ou também conhecida como perdas adicionais sob carga, estas perdas são ocasionadas pela distribuição não uniforme da corrente no cobre e pela distorção do fluxo magnético gerada pela corrente de carga da máquina. As perdas adicionais podem ser por fluxo disperso nos dentes, cantos de ranhuras, estrutura-suporte faces polares e etc.

Pesquisas diversas estão sendo realizadas por diversos grupos de pesquisadores para quantificar e minimizar perdas. Entre eles, foram citados aqui nesta dissertação: Komezha e outros, que apresentaram uma comparação de perdas sem carga e com carga, no total de seis diferentes motores de indução cujas potências nominais estão entre 3 kW e 280 kW. Os resultados mostram que as perdas adicionais no núcleo são fortemente dependentes da carga do

motor [22]. Adekitan e outros, que estudaram o comportamento das perdas frente a sistemas desequilibrados [23] e o uso de redes neurais em [24] para minimizar as perdas dos motores de indução, provocado pelo funcionamento abaixo do torque nominal.

## 2.6 RENDIMENTO

O rendimento de uma máquina é determinado pelas perdas geradas durante o seu funcionamento e com base no seu carregamento, onde uma máquina pode ter baixa perda e ter baixo rendimento se estiver operando em carga baixa.. De acordo com [25] a distribuição das perdas em um motor varia de acordo com o seu carregamento. Fora das condições nominais, a distribuição percentual das perdas é totalmente diferente da situação nominal, uma vez que o valor absoluto de cada componente das perdas totais varia significativamente.

O cálculo do rendimento é obtido através da relação – entre a potência de entrada e a potência de total entregue no eixo da máquina. Esse cálculo pode ser determinado através da Equação (2.12):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.12)$$

Onde:

$\eta$  = Rendimento;

$P_{out}$  = Potência de trabalho útil, em W;

$P_{in}$  = Potência total entregue a máquina, em W;

## 2.7 TÉCNICAS DE ACIONAMENTOS

Nos sistemas de transportadores de correia, são utilizados diversos tipos de técnicas de acionamento, cada uma delas possuem particularidades e funcionalidades diferentes, que devem ser avaliados seus aspectos técnicos e econômicos. As principais técnicas de acionamentos serão descritas nos próximos subitens.

### 2.7.1 TÉCNICAS DE ACIONAMENTO POR DISPOSITIVOS MECÂNICOS

As técnicas de acionamentos por dispositivos mecânicos são bastante utilizadas em sistemas de transportadores de correia, e são:

- **Redutor de velocidade:** é a técnica de acionamento mais utilizada, devido sua confiabilidade, elevado torque e constante mesmo diante de uma variação de carga.
- **Acoplamento hidrodinâmico:** esta técnica tem a finalidade de transmitir o torque do motor ao transportador de correia suavemente durante a partida, realizando uma rampa de aceleração até a sua velocidade nominal. Esta técnica possui algumas desvantagens, devido necessitar de uma manutenção especializada e realizar a variação da velocidade somente durante a partida;
- **Variador hidrodinâmico:** esta técnica se baseia no controle da entrada do fluído dentro da câmara, que permite variar a velocidade do transportador durante e depois da partida. Porém possui algumas desvantagens, como a necessidade de diversos equipamentos para o seu funcionamento, tais como bomba principal, bomba de recirculação, trocador de calor e bloco de controle.

### 2.7.2 TÉCNICAS DE ACIONAMENTO POR DISPOSITIVOS ELETROMECAÂNICOS CONVENCIONAIS

As técnicas de acionamento por dispositivos eletromecânicos, são bastante utilizadas e geralmente são compostas de contadores e relés. As principais técnicas são:

- **Partida direta:** esta técnica de acionamento é muito limitada e somente utilizada em acionamentos de baixa potência, devido a corrente de pico durante a partida, que pode chegar até dez vezes a sua corrente nominal;
- **Partida com resistência rotórica para motores de rotor bobinado:** esta técnica de acionamento é bastante utilizada em sistemas de transportador de correia, onde é necessário alto conjugado de partida com correntes baixas. Porém suas principais desvantagens estão no alto custo de aquisição e manutenção do MITRB;

### 2.7.3 TÉCNICAS DE ACIONAMENTO POR DISPOSITIVOS ELETROELETRÔNICOS

As técnicas de acionamentos por dispositivos eletroeletrônicos têm aumentado significativamente. Em sistemas de transportadores de correia, tal crescimento é devido à evolução dos ganhos alcançados em produtividade e eficiência energética em comparação com as técnicas de acionamentos mecânicos. As principais técnicas são:

- **Partida com *soft-starter*:** esta técnica de acionamento permite a realização da rampa de aceleração durante a partida e desaceleração durante a parada, através do controle eletrônico de tensão. Porém sua desvantagem está na limitação de utilização somente durante a partida e parada;
- **Partida com inversor de frequência:** esta técnica de acionamento é a mais promissora em aspectos técnicos e econômicos, que permite a realização do controle de velocidade, rampa de aceleração durante a partida e desaceleração durante a parada, através do controle eletrônico de tensão e frequência. As vantagens deste acionamento estão na eficiência energética e no aumento da vida útil dos motores.

Conforme já abordado, o *soft-starter* será o objeto desta pesquisa e para um melhor entendimento, será apresentado no item 2.8 o seu princípio de funcionamento e as suas principais características.

## 2.8 SOFT-STARTER

O *soft-starter* é um dispositivo eletroeletrônico que emprega semicondutores de potência e permite o controle das tensões aplicadas a um MIT, controlando o torque e a aceleração durante o momento da partida, visando reduzir os picos de corrente e os desgastes mecânicos. Esta técnica de acionamento também chamado de controlador de tensão CA é muito utilizado nos processos de partida suave do MIT. Conforme [26] os *soft-starters* permitem que a máquina inicie, varie sua velocidade e pare com tensões mecânicas e elétricas mínimas no equipamento. Isso pode ser feito ajustando apropriadamente a tensão do terminal do motor.

A chave *soft-starter*, em seu circuito de potência, basicamente consiste em um par de tiristores conectados em antiparalelo por cada fase. Estes tiristores são componentes semicondutores que tem a finalidade de controlar a tensão CA através da variação do ângulo de

disparo a cada semiciclo. A Figura 10 apresenta a configuração do circuito de potência do *soft-starter*.

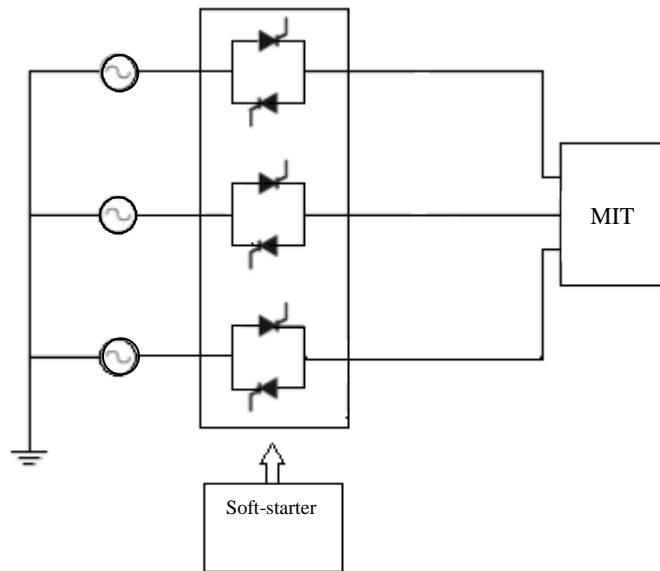


Figura 10 - Circuito de potência do *soft-starter* [27].

### 2.8.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do controlador de tensão CA pode ser explicado através do circuito indutivo monofásico apresentado na Figura 11, onde o fluxo de potência aplicada a carga é controlado através da variação dos ângulos de disparos dos tiristores T1 e T2.

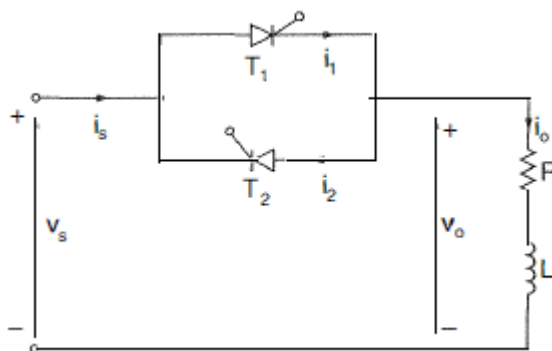


Figura 11 - Controlador de tensão CA monofásico [28].

Considerando o disparo do tiristor T1 durante o semiciclo positivo e o tiristor T2 durante o semiciclo negativo, pode ser observado que  $\omega t = \alpha$  é definido como o ângulo de disparo do tiristor T1 e  $\omega t = \pi + \alpha$  é o ângulo de disparo do tiristor T2. Os ângulos de disparo dos tiristores T1 e T2 estão defasados de  $180^\circ$ . Por se tratar de um circuito indutivo, o tiristor T1 conduzirá



até alcançar o seu ângulo de extinção em  $\omega t = \beta$  e não deixará de conduzir em  $\omega t = \pi$ , resultando em uma forma de onda de saída assimétrica. A Figura 12 apresenta as formas de onda da tensão instantânea de entrada  $V_s$ , disparos dos tiristores T1 e T2 e a corrente conduzida pelo tiristor T1.

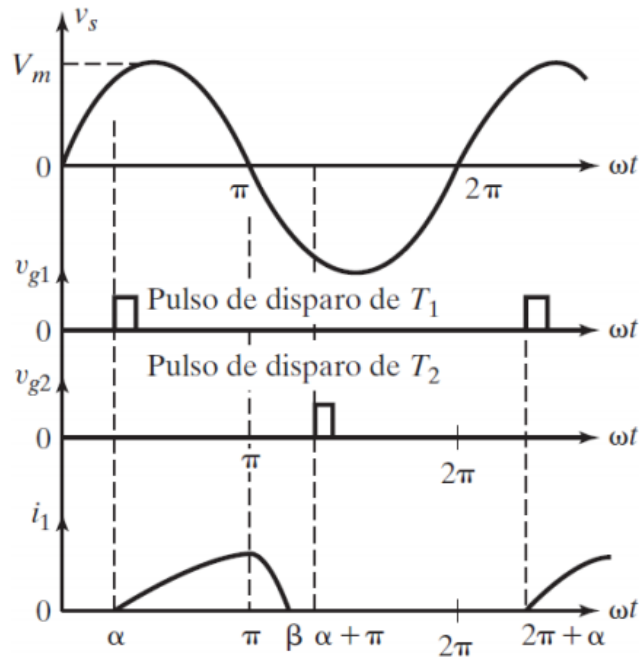


Figura 12 - Formas de onda da tensão instantânea [29].

A determinação do valor da corrente conduzida pelo tiristor T1, depende da tensão instantânea de entrada, do ângulo de disparo do tiristor T1 e da impedância e ângulo da carga e pode ser obtida através da Equação (2.13):

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} V_s}{Z} [\text{sen}(\omega t - \theta) - \text{sen}(\alpha - \theta) e^{(R/L)(\alpha/\omega - t)}] \quad (2.13)$$

Onde:

$i_1$  = Corrente do tiristor T1, em A;

$Z$  = Impedância da carga, em  $\Omega$ ;

$V_s$  = Tensão eficaz de entrada, em V;

$\theta$  = Ângulo do fator de potência da carga;

$\alpha$  = Ângulo de disparo do tiristor T1;

$R$  = Resistência da carga, em  $\Omega$ ;

$L$  = Indutância da carga, em mH;

$\omega t = \hat{\text{Ângulo de fase, em rad.}}$

O cálculo da tensão eficaz de saída pode ser obtido através da Equação (2.14):

$$V_0 = \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} 2V_s^2 \text{sen}^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

Onde:

$V_0 = \text{Tensão eficaz de saída, em V;}$

$\beta = \hat{\text{Ângulo de extinção de condução do tiristor T1.}}$

A determinação do valor da corrente eficaz do tiristor T1, pode ser obtida através da Equação (2.15):

$$I_1 = \frac{V_s}{Z} \left[ \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \{ \text{sen}(\omega t - \theta) - \text{sen}(\alpha - \theta) e^{(R/L)(\alpha/\omega - t)} \}^2 d(\omega t) \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

Onde:

$I_1 = \text{Corrente eficaz do tiristor T1, em A;}$

O cálculo da corrente eficaz de saída pode ser obtido através da soma das correntes eficaz dos tiristores T1 e T2 e apresentada na Equação (2.16):

$$I_0 = (I_1^2 + I_2^2)^{1/2} = \sqrt{2} I_R \quad (2.16)$$

Onde:

$I_0 = \text{Corrente eficaz de saída, em A;}$

$I_R = \text{Corrente eficaz de cada tiristor, assumindo } I_1 \text{ igual a } I_2, \text{ em A;}$

Conforme [30], a Figura 13 apresenta as características de torque *versus* velocidade obtidas para diferentes valores do ângulo de disparo dos tiristores. Note que para valores pequenos de  $0^\circ$  a  $30^\circ$ , as características de torque de velocidade são semelhantes. Isto pode ser explicado pelo fato de que para valores do ângulo de disparo menores ou igual ao ângulo de impedância da carga, há uma condução contínua. Assim, alterar o ângulo de disparo dentro

desse limite não terá efeito sobre a tensão aplicada ao motor. Portanto, os valores de torque e velocidade são mantidos inalterados.

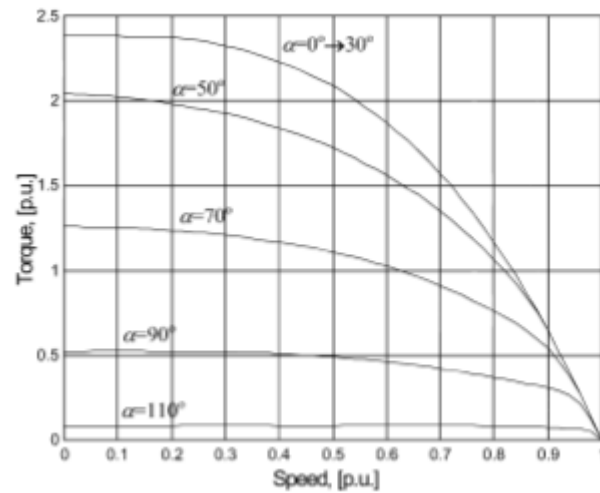


Figura 13 - Curva torque versus velocidade para valores de disparo [30].

Durante o momento de partida do motor a tensão aplicada, a corrente e o torque são reduzidos, devido o *soft-starter* variar a tensão para controlar a corrente e o torque. O torque desenvolvido pelo MIT é aproximadamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada. Dada essa relação, para uma redução de 60% na tensão aplicada resultaria em aproximadamente 84% de redução no torque gerado [31].

## 2.8.2 CONFIGURAÇÕES DE OPERAÇÃO

O *soft-starter* possui diversas configurações de operação, que visam a otimização do funcionamento do conjunto motor-carga. Estas configurações são parametrizadas no dispositivo de acordo com o perfil mais adequado de funcionamento. A configuração mais comum é a rampa de tensão na aceleração, onde a tensão de inicial de partida ( $U_P$ ) é ajustada como uma porcentagem da tensão nominal da rede ( $U_{Nom}$ ), durante o tempo da rampa de aceleração ( $t$ ) que define o tempo do incremento da rampa de tensão. Este ajuste deve ser realizado de forma a vencer a inércia da carga. A Figura 14 apresenta a rampa de aceleração aplicada a um motor genérico para efeito ilustrativo desta ação de comando/controle.

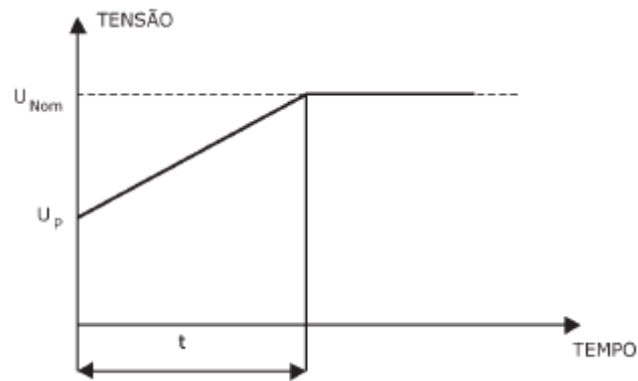


Figura 14 - Rampa de aceleração do motor [32].

A rampa de tensão na desaceleração é a configuração de operação utilizada no momento de parada do equipamento, onde ( $U_d$ ) é a tensão aplicada ao motor no início da desaceleração e ( $t_d$ ) é o tempo de decremento da rampa de tensão. Segundo [32], na parada controlada o *soft-starter* vai gradualmente reduzindo a tensão de saída até um valor mínimo em um tempo pré-definido. A Figura 15 apresenta a rampa de desaceleração aplicada ao motor.

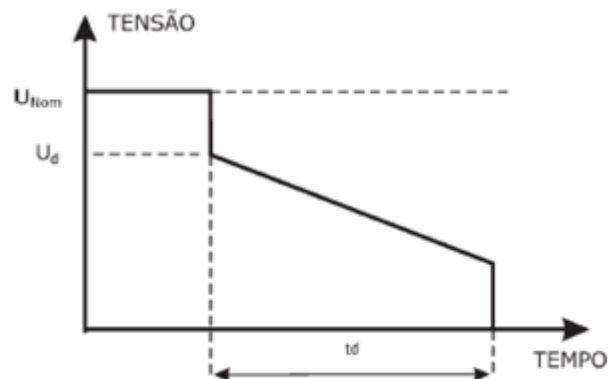


Figura 15 - Rampa de desaceleração do motor [32].

O *Kick Start* é a configuração de operação utilizada para partidas em que o acionamento necessita vencer elevadas inércias da carga, onde ( $U_K$ ) é o pulso de tensão aplicada ao motor durante o tempo de ajuste. O ajuste do tempo do pulso de tensão é aplicado de forma que o motor consiga vencer a inércia da carga. A Figura 16 apresenta o gráfico da partida pela configuração *Kick Start*.

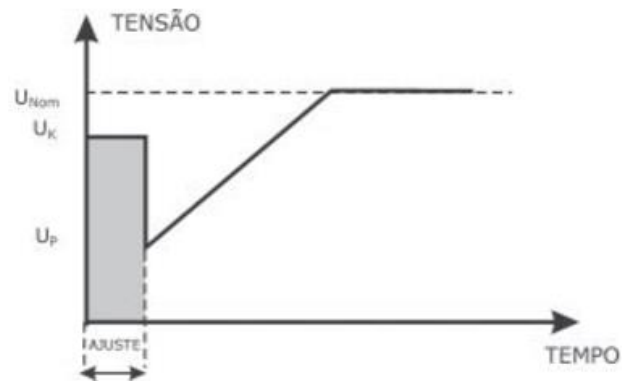


Figura 16 - Partida *Kick Start* [32].

A limitação de corrente é a configuração de operação utilizada para partidas de cargas com alto ou constante torque de partida, onde é ajustado o valor máximo de corrente acima da nominal fornecida ao motor, durante um determinado tempo de ajuste. A Figura 17 apresenta o gráfico da partida pela configuração de limitação de corrente.

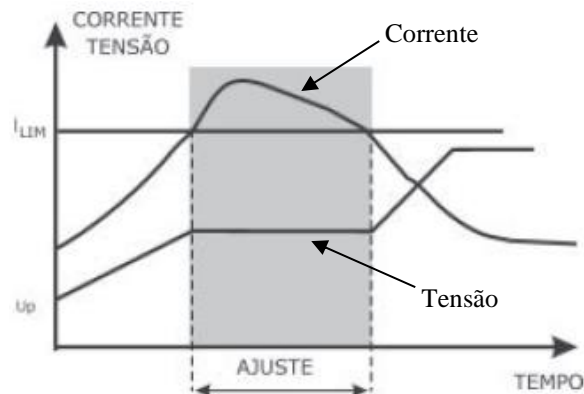


Figura 17 - Partida por limitação de corrente [32].

A configuração economia de energia é utilizada onde o motor opera com cargas inferiores a 50% da nominal, porém a sua aplicação gera harmônicos na rede devido a necessidade da variação do ângulo de disparo. Segundo [32], esta função reduz a tensão aplicada aos terminais do motor de modo que energia necessária para suprir o campo seja proporcional à demanda da carga. A Figura 18 apresenta o comportamento do conjugado a tensão nominal e reduzida.

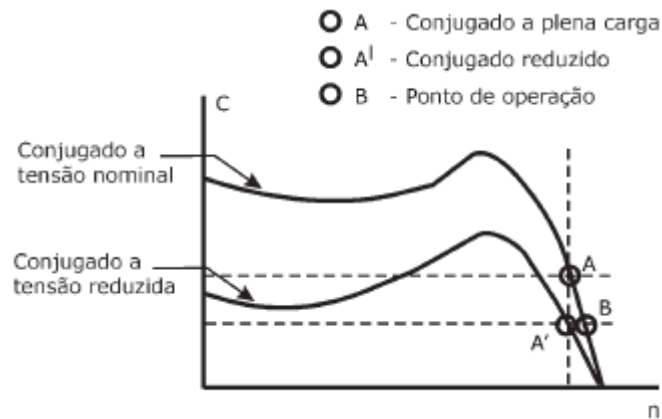


Figura 18 - Partida por economia de energia [32].

## 2.9 STATCOM

O *STATIC synchronous COMPensator* (STATCOM), é um dispositivo de compensação em derivação, que cuja a finalidade é a compensação de fator de potência ou a regulação de tensão na barra de conexão através do controle da potência reativa do equipamento. Este dispositivo é composto basicamente por transformador de acoplamento, estrutura magnética de redução de harmônicos, inversor, capacitor CC e um sistema de controle. A Figura 19 apresenta o diagrama em blocos simplificado deste dispositivo.

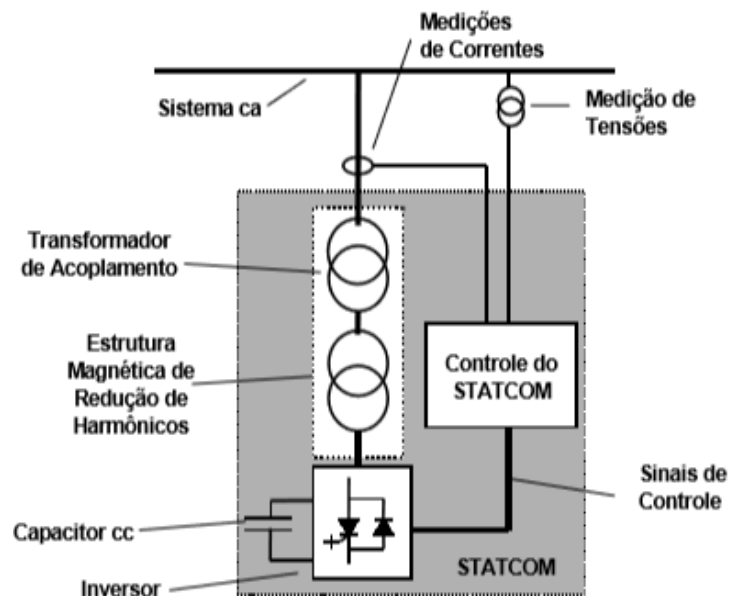


Figura 19 - Diagrama de blocos do STATCOM [33].

A capacidade ativa de geração ou absorção de energia do STATCOM é normalmente usada em circunstâncias especiais, como para melhorar o controle de tensão transitória e de

estado estável, para melhorar a capacidade de eliminação de afundamentos. Esse controle pode ser realizado pela variação do ângulo de disparo do tiristor ou pelo valor CC [34].

A geração de tensão CA no STATCOM é realizada através da tensão CC do inversor. Este inversor é constituído de semicondutores de potência e possui capacitores conectados para simular uma fonte de tensão CC. Além desta função, o capacitor tem a finalidade de armazenar energia temporariamente. O transformador de acoplamento é conectado ao sistema CA e suas principais funções são: reduzir a inserção de harmônicos na rede gerado pelo inversor e manter a tensão de saída e do sistema CA em fase.

### 2.9.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A troca de potência reativa entre o STATCOM e o sistema CA é realizado através do controle da amplitude de tensão de saída do dispositivo. Se as amplitudes da tensão de saída do STATCOM e a tensão do sistema CA forem iguais, a corrente reativa é zero e o dispositivo não gera e não absorve energia reativa. Se a amplitude da tensão de saída do STATCOM for aumentada acima da amplitude da tensão do sistema CA, a corrente flui através da reatância do transformador do dispositivo para o sistema CA, e o dispositivo em geral gera energia reativa (capacitiva). Se a amplitude da tensão de saída do STATCOM for diminuída para um nível abaixo do sistema CA, a corrente flui do sistema CA para o STATCOM, resultando na absorção de potência reativa (indutiva) pelo dispositivo. Como o STATCOM está gerando ou absorvendo apenas energia reativa, a tensão de saída e a tensão do sistema CA estão em fase [35]. O cálculo da potência reativa fornecido pelo STATCOM é obtido através da Equação (2.17):

$$Q = \frac{V_{STATCOM} - V_s}{X} V_s \quad (2.17)$$

Onde:

$Q$  = Potência reativa, em VA;

$V_{STATCOM}$  = Magnitude de tensão de saída do STATCOM, em V;

$V_s$  = Magnitude de tensão do sistema CA, em V;

$X$  = Impedância equivalente entre o sistema e o STATCOM, em  $\Omega$ .

A aplicação do controle de tensão do sistema CA pelo STATCOM é utilizado para fornecer o valor de tensão desejado no sistema, e o cálculo da amplitude de tensão pode ser obtido através da Equação (2.18):

$$v_{\Sigma Amp} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (2.18)$$

Onde:

$v_{\Sigma Amp}$  = Valor coletivo de tensão, em V;

$v_a$  = Tensão instantânea da fase A, em V;

$v_b$  = Tensão instantânea da fase B, em V;

$v_c$  = Tensão instantânea da fase C, em V.

O cálculo da tensão de referência pode ser obtido através da Equação (2.19):

$$V^* = \alpha \cdot I + V_o^* \quad (2.19)$$

Onde:

$V^*$  = Tensão de referência, em V;

$\alpha$  = Taxa de regulação;

$V_o^*$  = Tensão nominal de referência, em V.

O valor da taxa de regulação pode ser obtido através da Equação (2.20):

$$\alpha = \frac{V_{Max} - V_{Min}}{I_{IndMax} - I_{CapMax}} \quad (2.20)$$

Onde:

$V_{Max}$  = Tensão máxima, em V;

$V_{Min}$  = Tensão mínima, em V;

$I_{IndMax}$  = Corrente indutiva máxima, em A;

$I_{CapMax}$  = Corrente capacitiva máxima, em A;

O cálculo da tensão nominal pode ser obtido através da Equação (2.21):



$$v_o = \frac{V_{Min} \cdot I_{IndMax} - V_{Max} \cdot I_{CapMax}}{I_{IndMax} - I_{CapMax}} \quad (2.21)$$

O modo de operação mais utilizado no STATCOM, é baseado no controle por fonte de corrente, onde a corrente injetada realiza a compensação de reativos. Conforme [36], as principais vantagens de um compensador estático baseado em controle de fonte de corrente são: o esquema de controle simples usado para controlar a corrente do STATCOM por meio de um circuito aberto, a alta eficiência para cargas variáveis, devido à capacidade ajustável de corrente CC, e a alta qualidade na corrente CA STATCOM, devido ao uso de um filtro LC, no entanto, suas principais desvantagens são as perdas no indutor e nos semicondutores de potência.

## 2.10 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A crescente demanda e a utilização cada vez mais racional da energia elétrica no setor industrial, tem levantado a preocupação com os problemas de qualidade de energia elétrica (QEE). Segundo [37], a definição da QEE está relacionada a qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou frequência que resulte em uma falha ou na operação inadequada de equipamentos.

Os problemas de QEE podem ser ocasionadas por diversos fatores em que o sistema elétrico está sujeito, tais como, interrupções momentâneas de tensão, desequilíbrio de tensão, presença de harmônicos, flutuação de tensão, oscilação de potência e variação de frequência. Estes fatores podem ocasionar problemas que variam desde o funcionamento incorreto de equipamentos ou até mesmo a queima, além do impacto econômico relacionado ao mau funcionamento da rede elétrica.

A avaliação dos principais distúrbios relacionados aos problemas de QEE, devem ser analisados de forma integrada, pois, uma variação de tensão pode ser causada por problema de fator de potência, um problema de fator de potência pode ser causado pela existência de harmônicos, um desequilíbrio de tensão pode ser causado pela partida de algum equipamento. Assim, a partir dessa avaliação global, é possível identificar qual o maior ofensor de QEE da planta em análise e selecionar as melhores soluções.

A normatização e monitoração da QEE no Brasil, é regulamentada por normas nacionais e em alguns casos por regulamentações/recomendações internacionais. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabelece no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), os procedimentos referentes à QEE. Neste documento são definidos os fenômenos da qualidade de produto em regime permanente ou transitório, estabelecendo os limites ou valores de referência, terminologias e os indicadores. Atualmente este procedimento está em sua revisão 10 e com base nestas recomendações que este trabalho está se referenciando. A Tabela 2 apresenta os fenômenos definidos no módulo 8 do PRODIST.

Tabela 2 - Fenômenos de QEE definidos no módulo 8 do PRODIST [38].

<b>Regime</b>	<b>Fenômenos de QEE</b>
Permanente	Tensão em regime permanente
	Fator de potência
	Harmônicos
	Desequilíbrio de tensão
	Flutuação de tensão
	Variação de frequência
Transitório	Variações de tensão de curta duração - VTCD

### 2.10.1 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Conforme estabelecido em [38], os valores de tensão obtidos por medições devem ser comparados à tensão de referência, que deve ser a tensão nominal ou a contratada, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão. As tensões podem ser classificadas em três categorias: adequadas, precárias ou críticas, baseando-se no afastamento do valor da tensão de leitura em relação à tensão de referência. Os critérios de classificação apresentados na Tabela 3, são baseados na faixa de tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Tabela 3 - Critérios para classificação de tensão em regime permanente em pontos de conexão com tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV [38].

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)</b>
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$

Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

### 2.10.2 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão consiste nos valores divergentes entre fases de tensão em módulo e/ou em fases, com defasagem angular diferente de  $120^\circ$ , considerando um sistema trifásico. Pode ter origem externa ou interna, como por exemplo distribuição assimétrica das cargas pelas fases. A Figura 20 apresenta a representação no tempo das tensões desequilibradas.

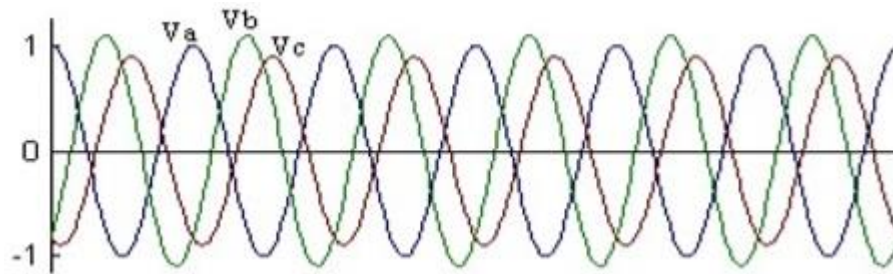


Figura 20 - Representação no tempo das tensões desequilibradas [39].

De acordo com [38], o fator de desequilíbrio (FD) pode ser calculado conforme as Equações (2.22) e (2.23).

$$FD\% = 100 \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.22)$$

Onde:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4)^2} \quad (2.23)$$

Onde:

$V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  = Magnitudes das tensões eficazes de linha na frequência fundamental, em V.

A Tabela 4 apresenta os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão. Estes limites representam o valor máximo recomendado a ser observado.

Tabela 4 - Limites para os desequilíbrios de tensão [38].

Indicador	Tensão Nominal ( $V_n$ )	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230\text{kV}$
FD%	3,00%	2,00%

### 2.10.3 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

As variações de tensão de curta duração (VTCD), são normalmente causadas por faltas e por energização ou desenergização de equipamentos de grande porte. Quanto maior a duração ou quanto mais brusca a variação de tensão, maior a probabilidade de afetar o funcionamento dos equipamentos ou instalações. Segundo [38], a VTCD são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. A Tabela 5 apresenta as classificações das variações de tensão de curta duração.

Tabela 5 - Classificação das variações de tensão de curta duração [38].

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u

	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u
--	-------------------------------	--	--------------------

Os indicadores associados com VTCD podem ser calculados de acordo com as seguintes Equações (2.24), (2.25) e (2.26) que estão definidas em [38].

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100 \quad (2.24)$$

Onde:

$V_e$  = Amplitude do evento de VTCD, em %;

$V_{res}$  = Tensão residual do evento de VTCD, em V;

$V_{ref}$  = Tensão de referência, em V.

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (2.25)$$

Onde:

$\Delta t_e$  = Duração do evento de VTCD, em ms;

$t_f$  = Instante final do evento de VTCD;

$t_i$  = Instante inicial do evento de VTCD.

$$f_e = n \quad (2.26)$$

Onde:

$f_e$  = Frequência de ocorrência de eventos de VTCD;

$n$  = Quantidade de eventos de VTCD registrados no período de avaliação.

#### 2.10.4 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência (FP) é a razão entre a potência ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados da potência ativa e reativa. De acordo com o [38], o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo.

O cálculo do FP deve ser realizado a partir dos valores medidos de potência ativa e potência reativa e que pode ser obtido através da Equação (2.27).

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.27)$$

Onde:

fp = Fator de potência;

P = Potência ativa;

Q = Potência reativa.

### **2.10.5 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA**

Conforme [38], o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Quando da ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne, no intervalo de tempo de 30 (trinta) segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

### 3 DESCRIÇÃO DO CASO

O presente estudo será realizado em um terminal de exportação de minério de ferro, cuja principal finalidade é movimentar o minério de ferro desde a descarga nos pátios de estocagem até o embarque em navios graneleiros para exportação. Neste terminal são utilizados 19 transportadores de correia no processo de movimentação de minério, que podem chegar a 2 km de comprimento horizontal. O layout do terminal estudado é apresentado na Figura 21, onde o transportador analisado está destacado em vermelho.

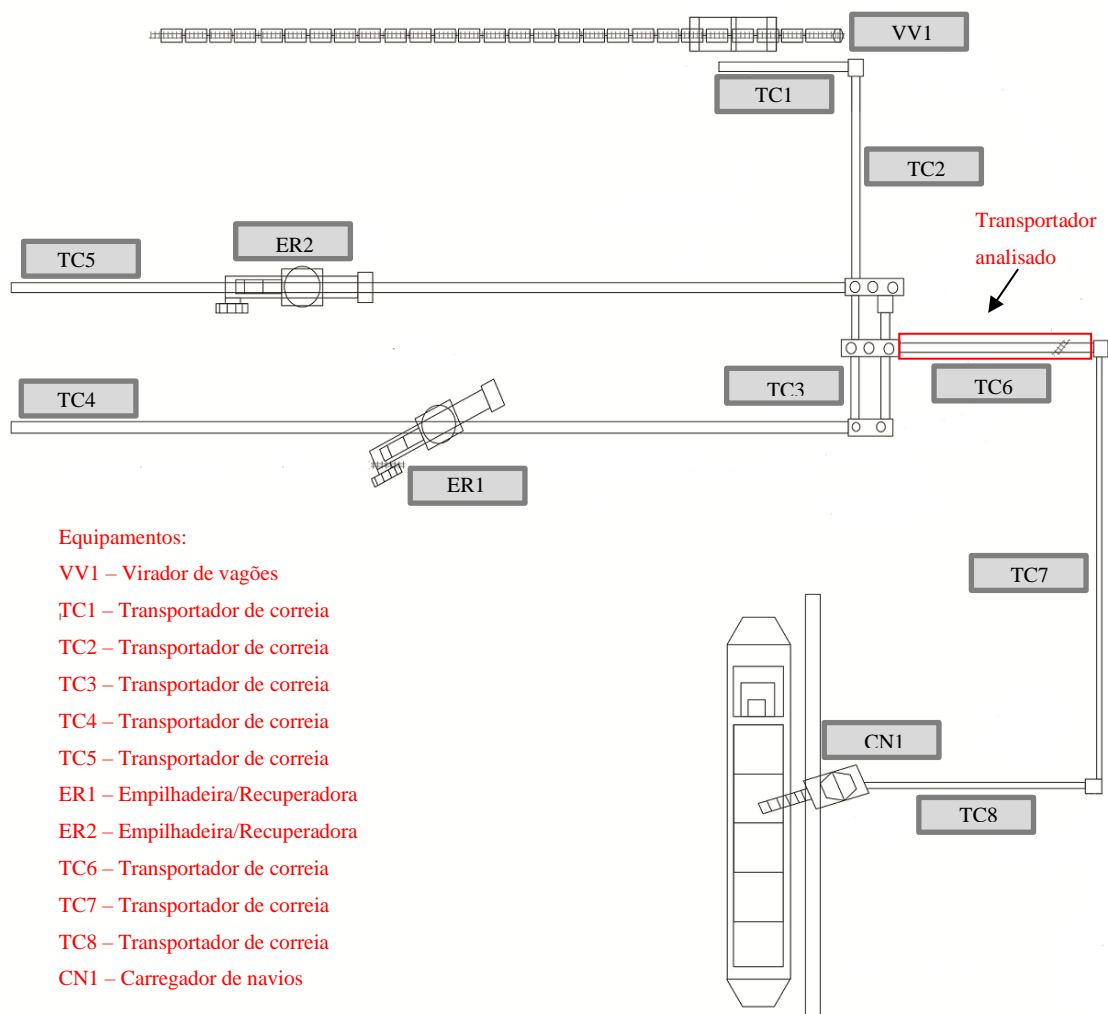


Figura 21 - *Layout* dos equipamentos do terminal.

A correia transportadora analisada possui comprimento horizontal de 588 m, com a capacidade nominal de transporte de 9.000 ton/h e acionada por MITRB de média tensão com velocidade constante. O MITRB é alimentado por um barramento de 4,16 kV através de contator de vácuo, que também é conectado por uma rede de distribuição aérea de 13,8 kV, onde um transformador abaixador de 13,8 – 4,16 kV é utilizado. A Figura 22 e a Figura 23,

apresentam o diagrama unifilar do sistema de distribuição elétrica na qual o acionamento do motor do transportador de correia analisado é alimentado.



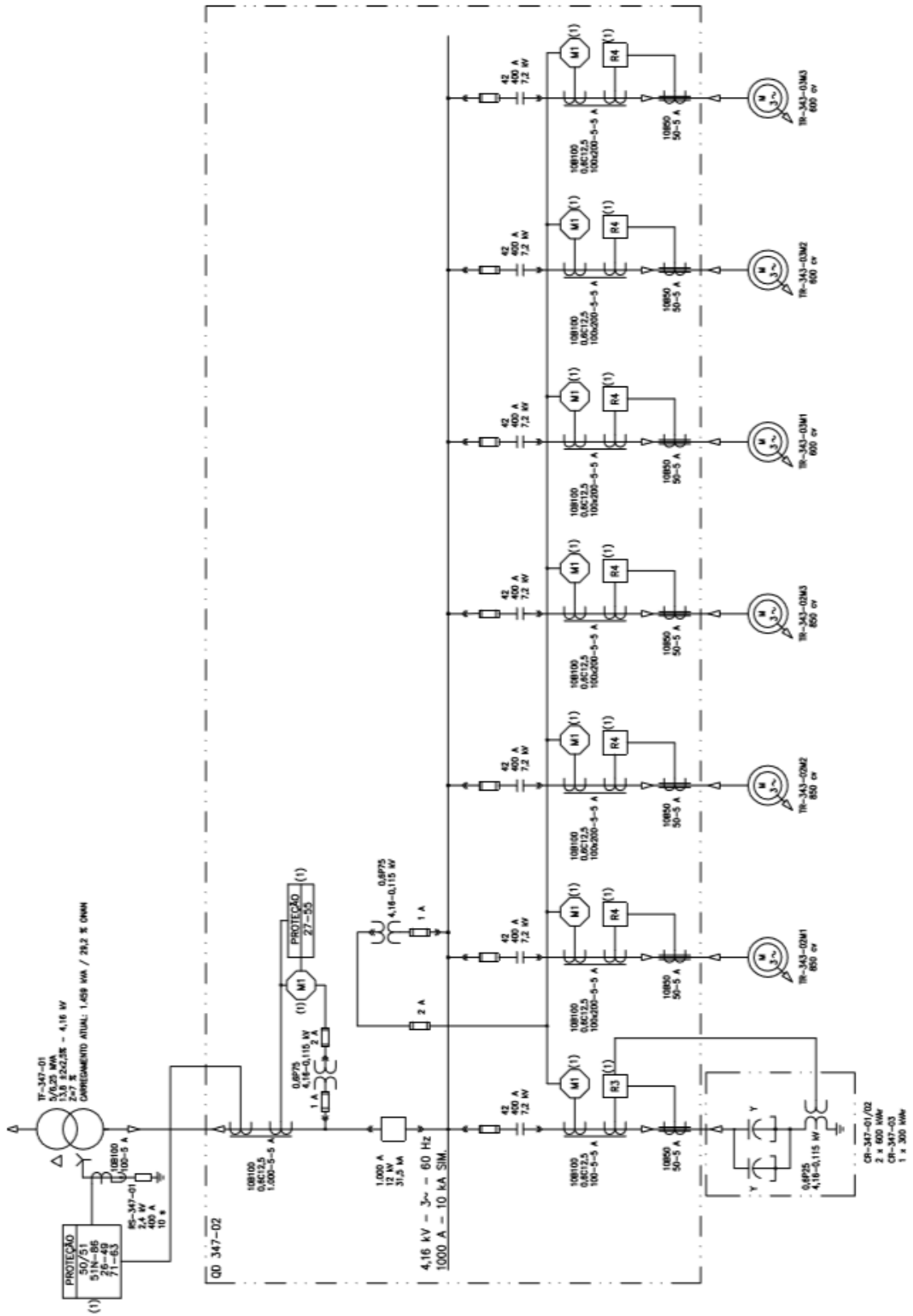


Figura 22 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição elétrica de correias transportadoras.

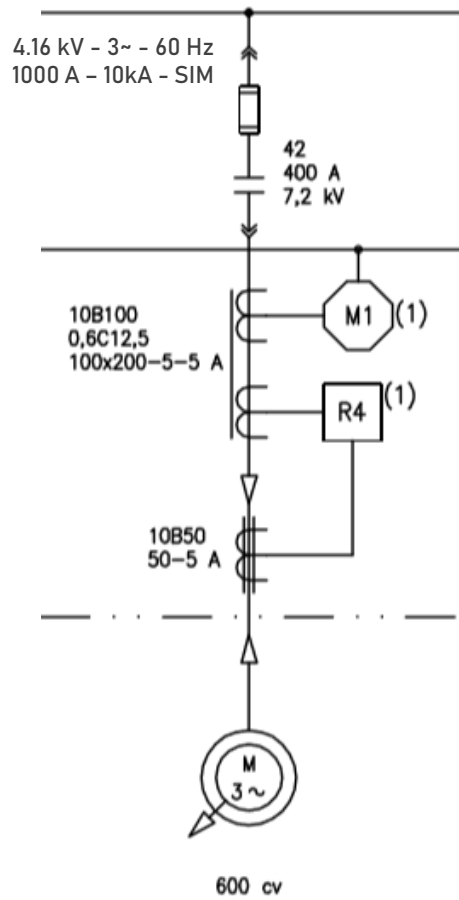


Figura 23 - Diagrama unifilar do acionamento analisado.

O método de partida utilizado para o MITRB é realizado por meio de resistências rotóricas. Durante a partida, todas as resistências (R1, R2, R3, R4, R5, R6 e RP) são inseridas ao circuito rotórico do motor e são postas em curto circuito gradativamente com exceção da resistência RP, até alcançar sua velocidade nominal através de contatores de passo, proporcionando uma rampa de aceleração com partida suave. A Figura 24 apresenta o diagrama de comando de partida por resistências rotóricas.

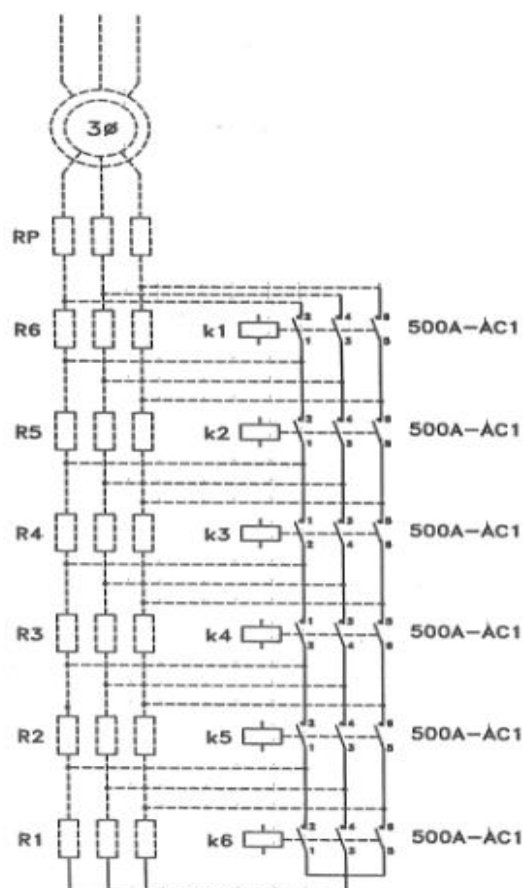


Figura 24 - Diagrama de comando de partida por resistência rotórica.

O processo de rampa de aceleração leva em torno de 35,5 s desde o início de partida. Após esse tempo, o motor atinge a velocidade nominal. A Tabela 6 apresenta o valor ôhmico de cada resistência e o tempo de operação por estágio.

Tabela 6 - Tempo de operação de cada estágio e valor ôhmico de cada resistência.

SETOR	Resistência rotóricas, valores individuais (Ohms)	TEMPO DE OPERAÇÃO POR ESTÁGIO (segundos)
R1	0,978	7
R2	0,445	24
R3	0,092	26
R4	0,202	27
R5	0,019	32

R6	0,042	35,5
RP	0,022	CONTÍNUO

A fim de identificar claramente os problemas de qualidade de energia elétrica e de conservação de energia, o fornecimento e as condições de operação são cuidadosamente analisados, medições de tensão, corrente, harmônicos e potência são realizadas no motor do transportador de correia. Além dos aspectos relacionados acima, é possível identificar duas características negativas nesse tipo de acionamento: a ausência de controle de velocidade e a utilização do banco de resistência apenas no momento da partida.

Os dados de placa do motor analisado são apresentados conforme a Tabela 7. Um ponto a ser ressaltado, é que apesar da tensão do barramento ser maior que a tensão nominal do motor, não é ocasionado impacto no funcionamento do MITRB.

Tabela 7 - Dados de placa do MITRB.

<b>MOTOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO</b>	
POTÊNCIA (CV)	600
ROTAÇÃO (rpm)	1185
CORRENTE ESTATOR (A).	80,2
TENSÃO ESTATOR (V)	4000
FREQUÊNCIA (Hz)	60
FATOR DE POTÊNCIA	0,832
RENDIMENTO (%)	95,4
FATOR DE SERVIÇO	1,00
CARCAÇA	450B110
CORRENTE ROTOR (A)	380
TENSÃO ROTOR (V)	710

### 3.1 MEDIÇÕES EM CAMPO

Para a realização do estudo de caso proposto, foram executadas as medições de campo para a análise das características de funcionamento do MITRB estudado, cujos dados de placa foram apresentados na Tabela 7.

Na medição utilizou-se o instrumento Fluke 435 *Series II Power Quality and Energy Analyzer* para a aquisição de dados de energia e qualidade de energia no terminal. A Figura 25 apresenta o analisador de energia.



Figura 25 - Fluke 435 *Series II Power Quality and Energy Analyzer* [40].

As medições foram realizadas em diferentes períodos de tempo, porém dentre os diversos períodos de aquisição de dados, foi escolhido o período onde foi constatado a operação do sistema em plena carga. O período analisado corresponde ao intervalo das 13:03h do dia 13 de novembro de 2018 até 11:35h do dia 14 de novembro de 2018, com a tomada de dados a cada 10 segundos. Para a análise dos dados coletados foi utilizado o *software* Power Log 5.6.

### 3.2 AVALIAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O comportamento das tensões fase-fase durante o período analisado foram extraídas do *software* Power Log e podem ser observadas nos histogramas, que apresentam os números de eventos para cada valor de tensão conforme as Figuras 26, 27 e 28. As informações coletadas pelo instrumento não foram inseridas neste texto em sua totalidade, mas somente aquelas que são pertinentes para as análises que foram efetuadas. Nas Figuras 26, 27 e 28, o eixo X representa o valor da tensão em Volts e o eixo Y representa a quantidade de eventos ocorridos durante o período analisado.

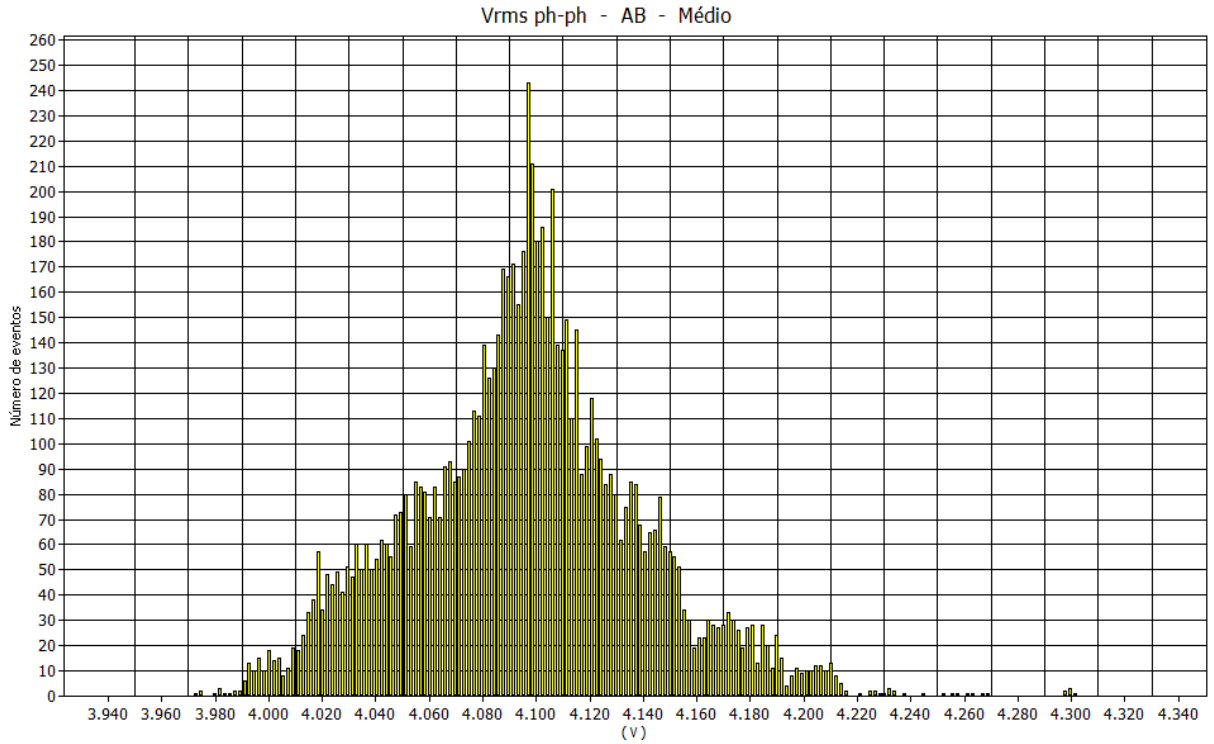


Figura 26 - Número de eventos para cada valor da tensão  $V_{AB}$  no período analisado.

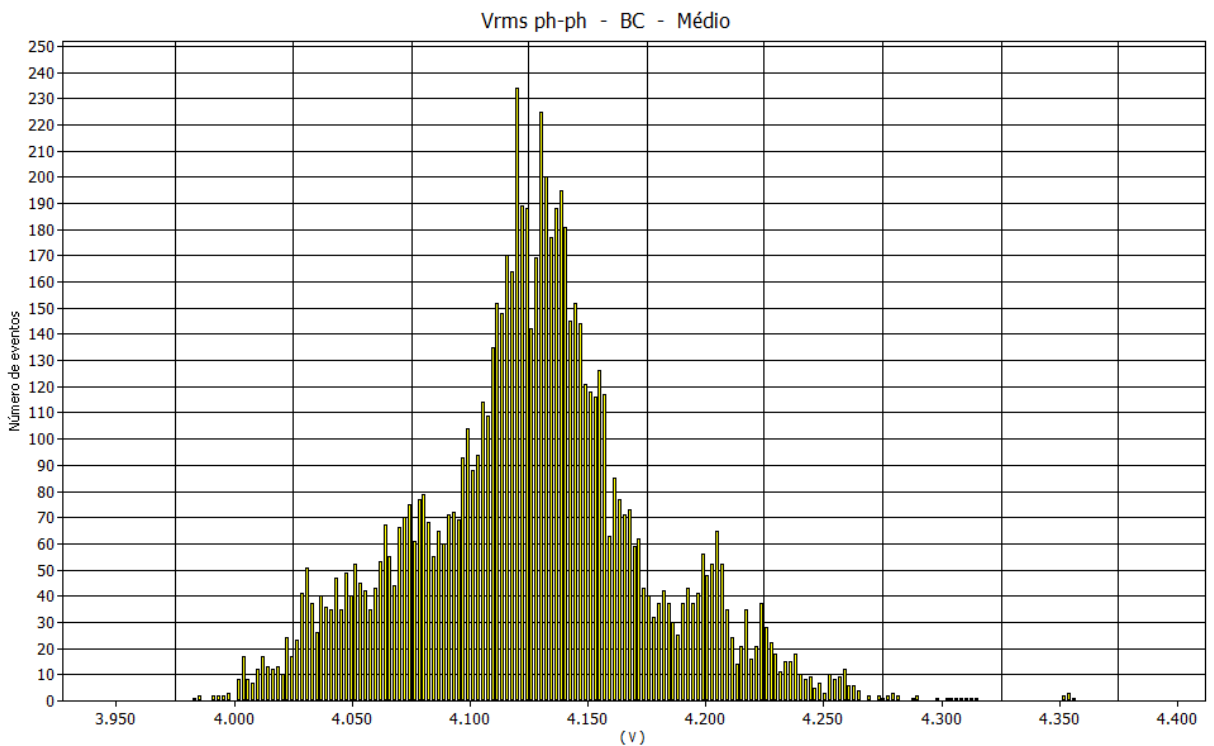


Figura 27 - Número de eventos para cada valor da tensão  $V_{BC}$  no período analisado.

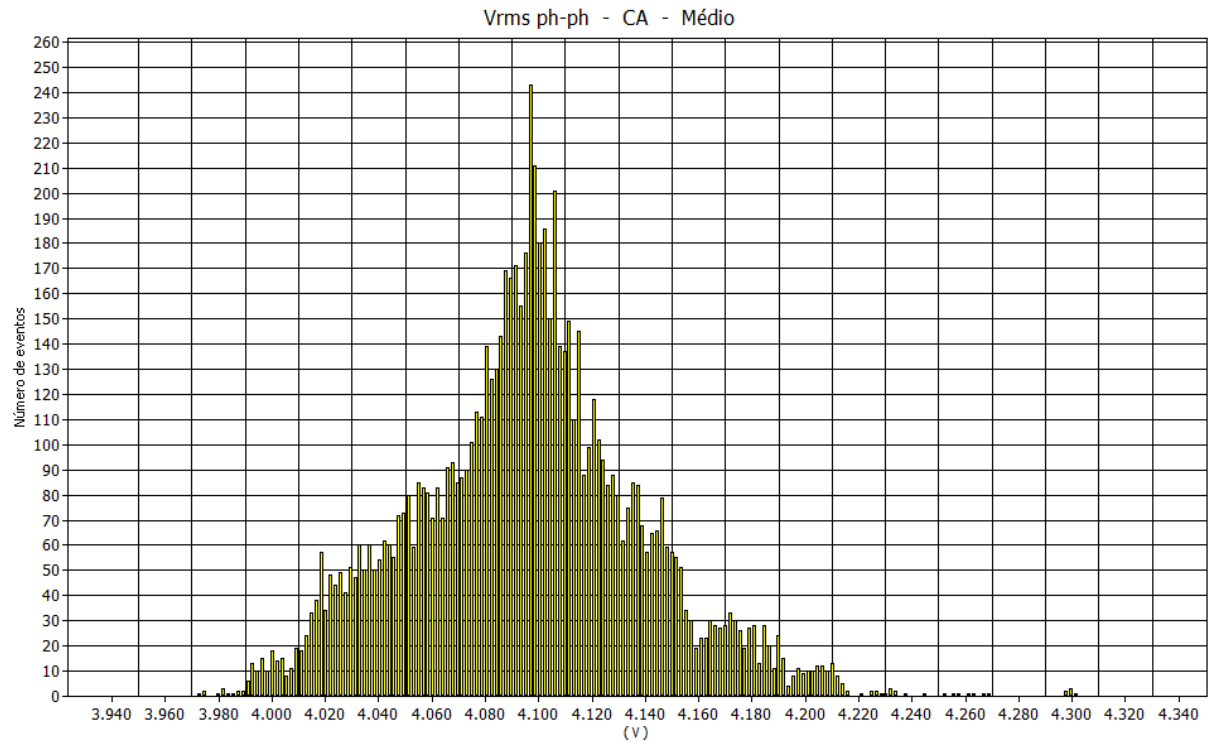


Figura 28 - Número de eventos para cada valor da tensão  $V_{CA}$  no período analisado.

Os valores “95% percentil” apresentados nas Figuras 29, 30 e 31, que representam as médias dos valores que mais se repetiram em 95% das medições, foram calculados de acordo com a equação (2.23), onde foram aplicados os valores “95% percentil” obtidos durante o período de medição das fases  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$ , encontrando um  $\beta$  igual a 0,33 e conforme a equação (2.22), foi obtido o fator de desequilíbrio (FD) igual a 0,64%. Esse valor não ultrapassa o limite estabelecido em [38], conforme já mencionado no item 2.10.2, que deve ser inferior a 2%. As Figuras 29, 30 e 31 foram obtidas do *software* Power Log 5.6.

Vrms ph-ph		AB
<b>Sumário</b>		
De	13/11/2018 13:03:18	
Para	14/11/2018 11:35:38	
Valor máximo	4301,64 V	
Em	13/11/2018 18:50:08	
Valor mínimo	3972,6 V	
Em	14/11/2018 05:07:58	
$\mu$ (Méd.)	4096,48 V	
s	43,0492 V	
5% percentil	4024 V	
95% percentil	4172 V	
% [85% - 110%]	0%	
% [90% - 110%]	0%	

Figura 29 - Resumo das informações da tensão  $V_{AB}$  durante o período analisado.

Vrms ph-ph		BC
<b>Sumário</b>		
De	13/11/2018 13:03:18	
Para	14/11/2018 11:35:38	
Valor máximo	4356,36 V	
Em	13/11/2018 18:50:18	
Valor mínimo	3983,04 V	
Em	14/11/2018 05:07:58	
$\mu$ (Méd.)	4126,72 V	
s	49,6879 V	
5% percentil	4041 V	
95% percentil	4212 V	
% [85% - 110%]	0%	
% [90% - 110%]	0%	

Figura 30 - Resumo das informações da tensão  $V_{BC}$  durante o período analisado.



Vrms ph-ph		CA
<b>Sumário</b>		
De	13/11/2018 13:03:18	
Para	14/11/2018 11:35:38	
Valor máximo	4301,64 V	
Em	13/11/2018 18:50:08	
Valor mínimo	3972,6 V	
Em	14/11/2018 05:07:58	
$\mu$ (Méd.)	4096,48 V	
s	43,0492 V	
5% percentil	4024 V	
95% percentil	4172 V	
% [85% - 110%]	0%	
% [90% - 110%]	0%	

Figura 31 - Resumo das informações da tensão  $V_{CA}$  durante o período analisado.

### 3.3 AVALIAÇÃO DO PERFIL DE TENSÃO EFICAZ

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam, respectivamente, as curvas dos valores eficazes das tensões entre fases  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$ , onde são exibidos conforme legenda os valores mínimos, médios e máximo durante todo o intervalo da medição. As Figuras 32, 33 e 34, foram obtidas do *software* Power Log 5.6, onde o eixo X representa o tempo em h, e o eixo Y representa os valores de tensão entre fases em kV obtidos durante o período de medição.

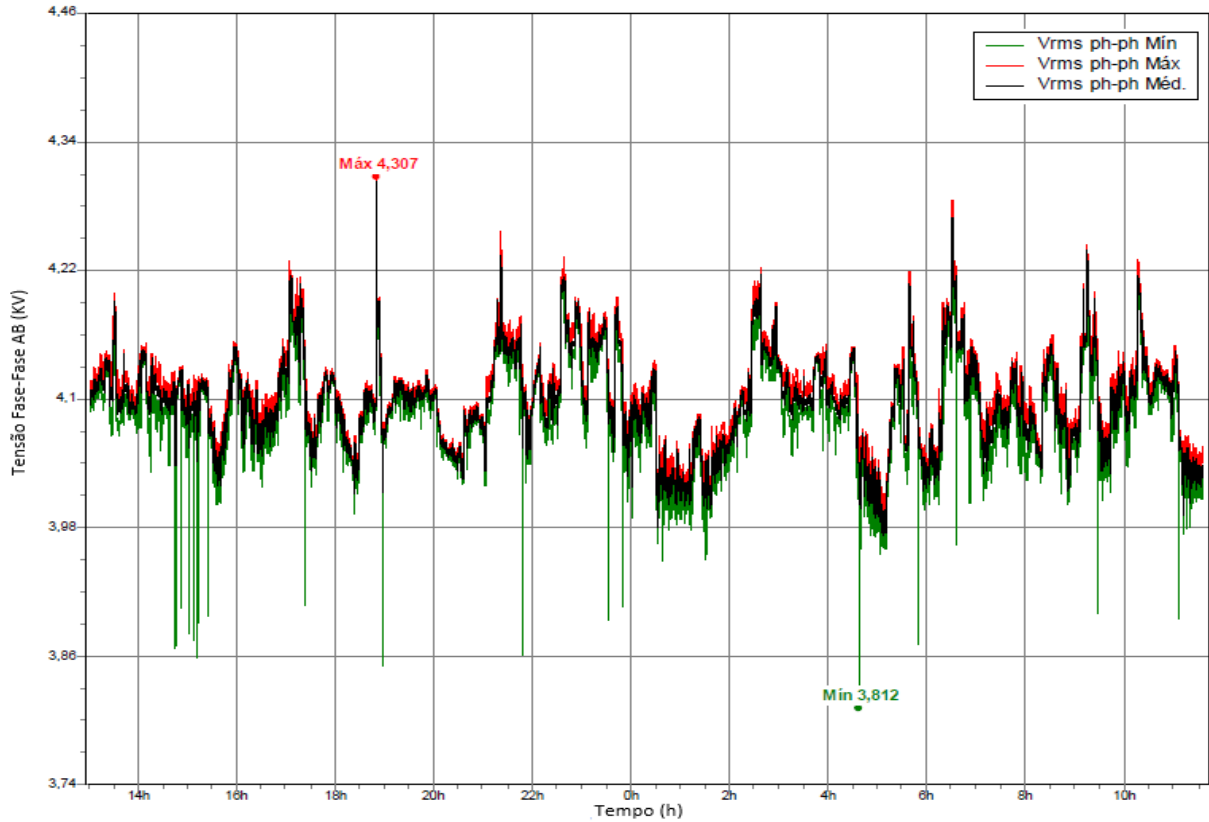


Figura 32 - Curva da tensão  $V_{AB}$  durante todo o período de medição.

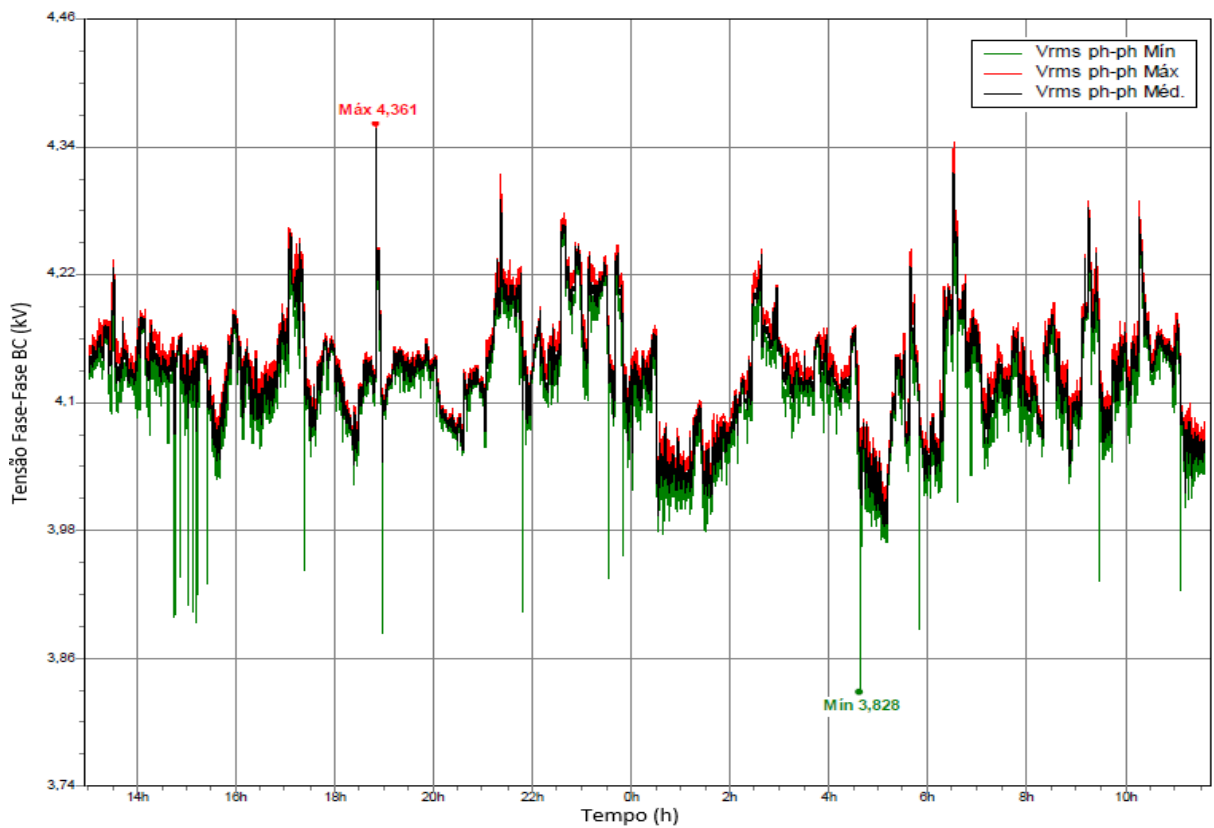


Figura 33 - Curva da tensão  $V_{BC}$  durante todo o período de medição.

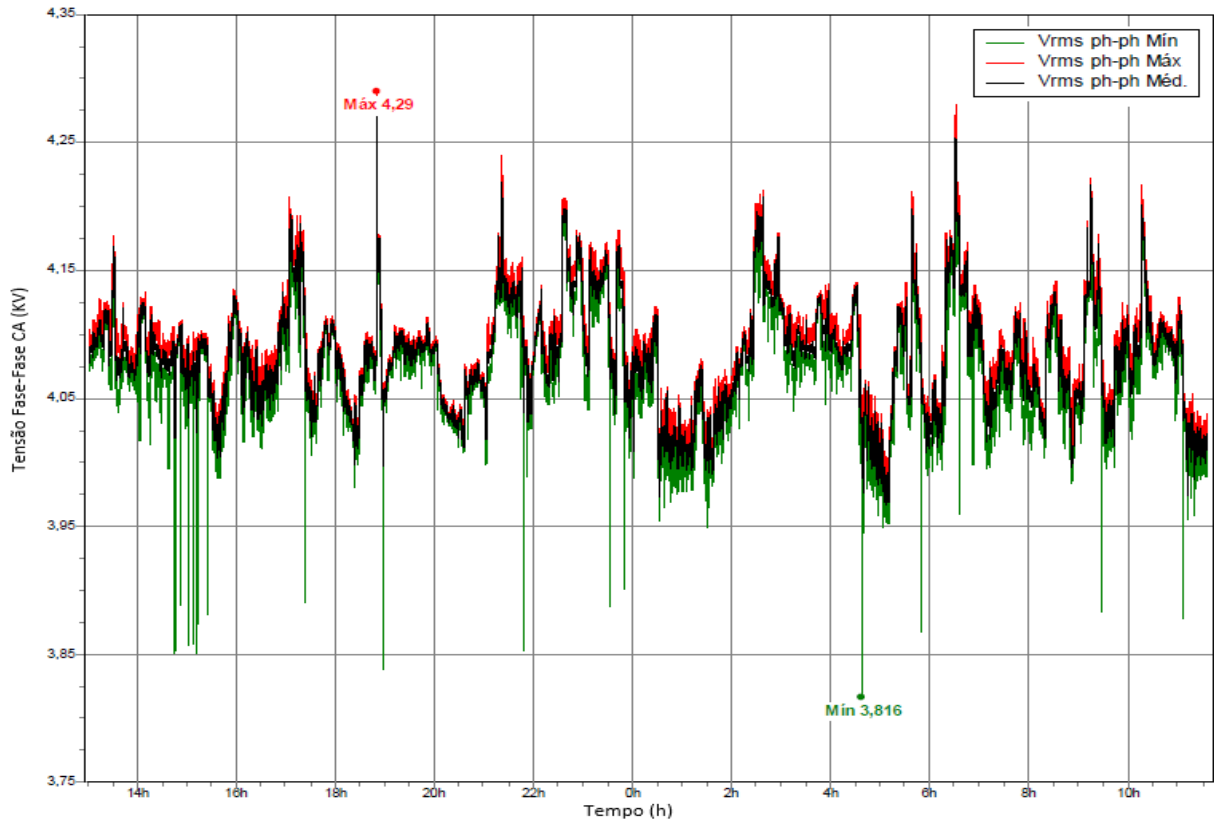


Figura 34 - Curva da tensão  $V_{CA}$  durante todo o período de medição.

No gráfico da tensão  $V_{BC}$  apresentado na Figura 33, foi encontrado o valor máximo de tensão entre fases igual a 4,36 kV durante o intervalo de medição. Esse valor corresponde a 1,05 p.u., considerando 4,16 kV como tensão de referência. Conforme limite estabelecido em [38], não houve violação da amplitude de tensão em relação à tensão de referência.

No gráfico da tensão  $V_{BC}$  apresentado na Figura 33, foi encontrado o valor mínimo de tensão entre fases igual a 3,81 kV durante o intervalo de medição. Esse valor corresponde a 0,92 p.u., considerando 4,16 kV como tensão de referência. Conforme limite estabelecido em [38], não houve violação da amplitude de tensão em relação à tensão de referência. Conforme apresentado nas Figuras 32, 33 e 34, os valores mínimos medidos das tensões  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  são todos menores que 3,86 kV, onde é o limite inferior para o valor de tensão ser considerado adequado estabelecido em [38], tendo como tensão de referência 4,16 kV.

As Figuras 35, 36 e 37 apresentam os valores extremos inferiores encontrados nas tensões  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$ , respectivamente, indicando que durante o período da medição, o valor mínimo de tensão 3,86 V foi violado. As Figuras 35, 36 e 37, foram obtidas do *software* Power Log 5.6.

Data / Hora	Valor
14/11/2018 04:37:18	3811,6802
13/11/2018 18:57:48	3851,28
13/11/2018 15:11:18	3858,4802
13/11/2018 21:48:58	3860,6401
13/11/2018 14:45:28	3867,1201

Figura 35 - Valores extremos inferiores da tensão  $V_{AB}$ .

Data / Hora	Valor
14/11/2018 04:37:18	3827,5203
13/11/2018 18:57:48	3884,04
14/11/2018 05:49:28	3886,9202
13/11/2018 15:11:18	3892,6802
13/11/2018 14:45:28	3898,4402

Figura 36 - Valores extremos inferiores da tensão  $V_{BC}$ .

Data / Hora	Valor
14/11/2018 04:37:18	3811,6802
13/11/2018 18:57:48	3851,28
13/11/2018 15:11:18	3858,4802
13/11/2018 21:48:58	3860,6401
13/11/2018 14:45:28	3867,1201

Figura 37 - Valores extremos inferiores da tensão  $V_{CA}$ .

Mediante observação das Figuras 32, 33 e 34 também é possível verificar que os valores máximos de tensão não ultrapassaram 4,36 kV, que é o limite superior para classificação de tensão adequada.

Nenhum dos valores encontrados foram menores que 3,74 kV ou maiores que 4,36 kV, que caracterizaria uma tensão crítica. Dessa forma, conclui-se que, durante alguns instantes, por conta da violação do limite inferior de 3,86 kV, a tensão medida foi precária, mas em nenhum momento ela foi crítica.

### 3.4 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

No gráfico da frequência apresentado na Figura 38, onde são exibidos conforme legenda os valores de frequência mínima, média e máxima durante todo o intervalo da medição. O valor mínimo de frequência medido foi igual a 58,896 Hz, portanto conforme estabelecido em [38], houve violação dos limites mínimos de frequência. A Figura 38 foi obtida do *software* Power

Log 5.6, onde o eixo X representa o tempo em h, e o eixo Y representa os valores de frequência em Hz obtidos durante o período de medição.

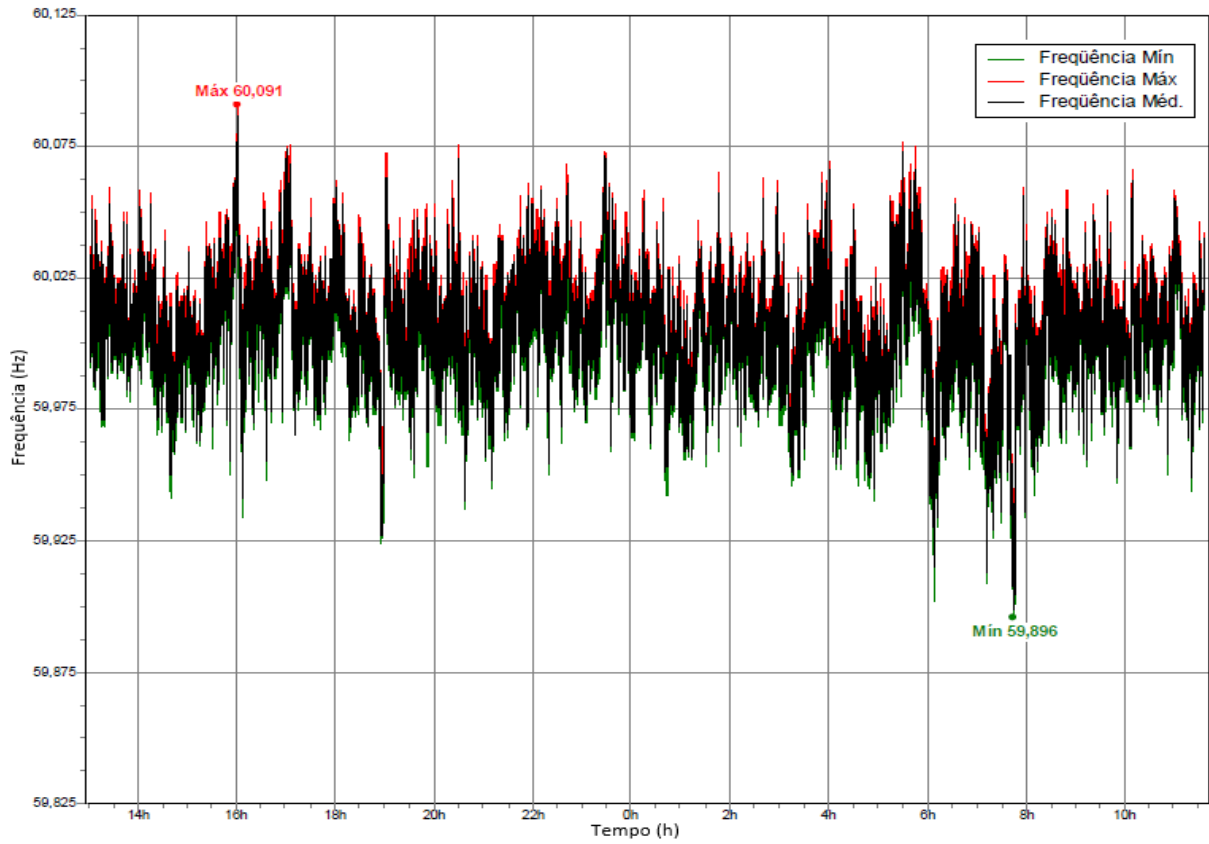


Figura 38 - Gráfico da frequência.

#### 4 MODELAGEM E VALIDAÇÃO

O PSCAD (*Power Systems Computer Aided Design*) é uma ferramenta de simulação baseada em um mecanismo de solução de transientes eletromagnéticos EMTDC (*Electromagnetic Transients including DC*), que permite a construção, simulação e análise de resultados de sistemas de energia CA e CC em um ambiente gráfico. O PSCAD/EMTDC possui uma vasta biblioteca de modelos composta de máquinas elétricas, dispositivos, medidores, funções de controle, entre outros.

Para a realização da simulação do estudo de caso e soluções propostas, foram utilizados diversos modelos contidos na biblioteca do PSCAD/EMTDC. Os elementos do sistema como motores, transformadores e cabos foram modelados tomando como base os dados de projeto da planta analisada, como lista de cargas e folha de dados de equipamentos. Com a finalidade de padronização e a obtenção de um melhor resultado, em todas as simulações foram utilizados o mesmo passo de solução de  $50 \mu\text{S}$  (*solution time step*) e o mesmo passo de amostragem de  $5.000 \mu\text{S}$  (*channel plot step*).

##### 4.1 MOTOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO E RESISTÊNCIA ROTÓRICA

O modelo do MITRB utilizado nas simulações é apresentado na Figura 39, onde as entradas ‘A’, ‘B’ e ‘C’ são utilizadas para conexão da rede de alimentação do sistema modelado. A entrada ‘S’ é utilizada para seleção do modo de controle, que pode ser configurado para controle de velocidade da máquina através da entrada ‘W’, ou para controle de torque mecânico no eixo da máquina através da entrada ‘TL’. As entradas ‘a’, ‘b’ e ‘c’ são utilizadas para conexão do circuito rotórico do motor.

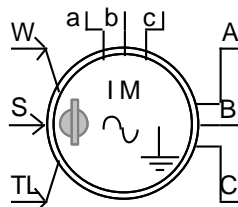


Figura 39 - Figura das tabelas de parâmetros do PSCAD/EMTDC.

A modelagem do banco de resistência conectado ao circuito rotórico da máquina pode ser observada na Figura 40, onde as resistências internas do rotor são inseridas em série com as resistências externas controladas ‘Rrotor’.

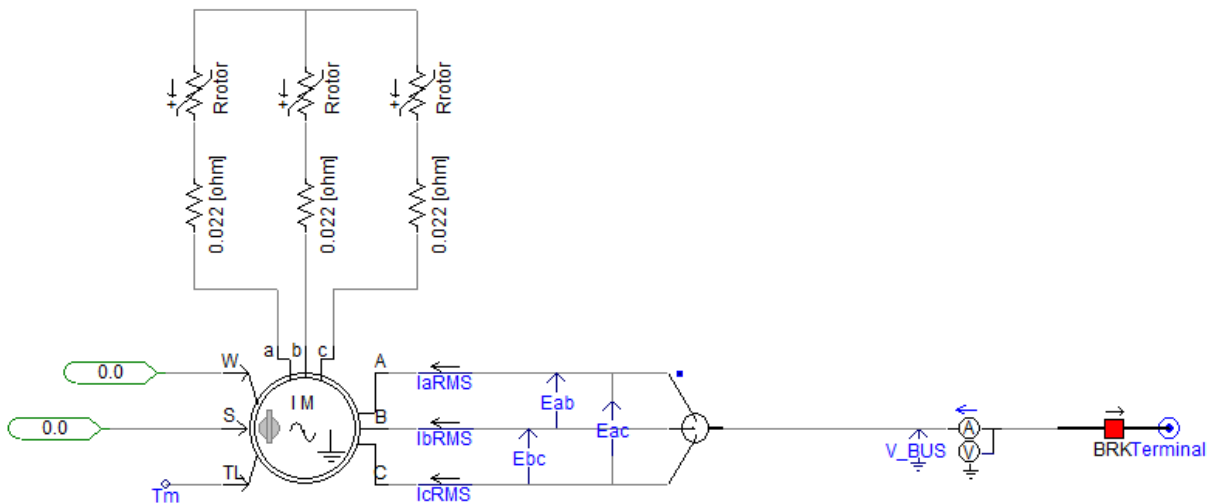


Figura 40 - Modelagem do motor com partida rotórica no PSCAD/EMTDC.

Para a modelagem da partida do motor por resistência rotórica, foi necessário criar um bloco de controle das resistências externas controladas 'Rrotor', conforme apresentado na Figura 41, onde é simulado a retirada das resistências com base no tempo de cada estágio durante a partida. Este tempo de cada estágio foi inserido conforme folha de dados do projeto de implantação do acionamento estudado.

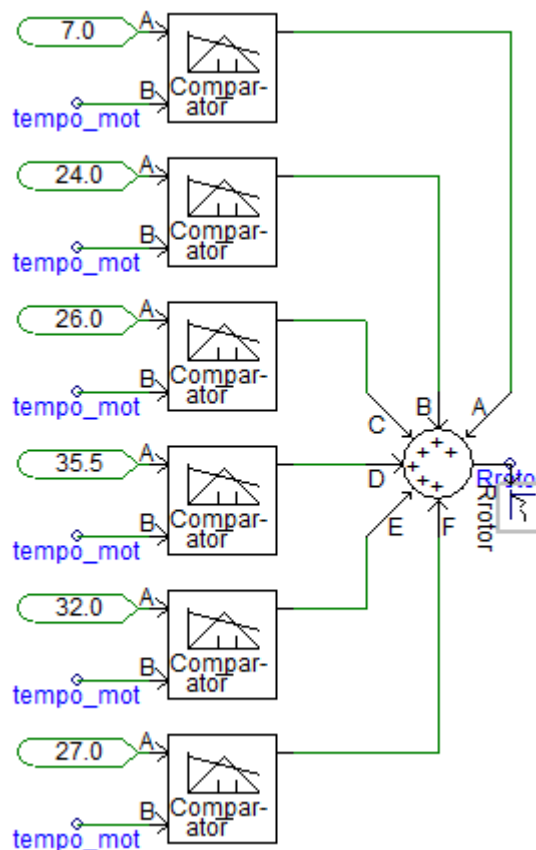


Figura 41 - Modelagem do bloco de controle das resistências externas no PSCAD/EMTDC.

## 4.2 TRANSFORMADOR

No sistema elétrico analisado, foram modelados 2 transformadores abaixadores, um transformador de alta tensão (138 kV) com comutador de derivação em carga, e um transformador de média tensão (13,8 kV). O transformador de alta é responsável pela alimentação principal da planta. Já o transformador de média é responsável pela alimentação da barra dos motores. A Tabela 8 apresenta os dados dos transformadores, que são obtidos através das folhas de dados de projeto.

Tabela 8 - Dados dos transformadores.

DADOS TRANSFORMADORES			
TRANSFORMADOR	TENSÃO (kV)	POTÊNCIA (MVA)	IMPEDÂNCIA (%)
TF1	138/13,8	15/20	8,99
TF2	13.8/4,16	5/6.25	7

Para modelagem do transformador com comutador de derivação em carga, foi necessário utilizar um bloco de controle para controlar automaticamente a comutação de *tap*. Neste bloco de controle, foram inseridos os dados de projeto do comutador aplicado na planta analisada. A Figura 42 apresenta o modelo do transformador com comutador de derivação em carga e seu respectivo bloco de controle.

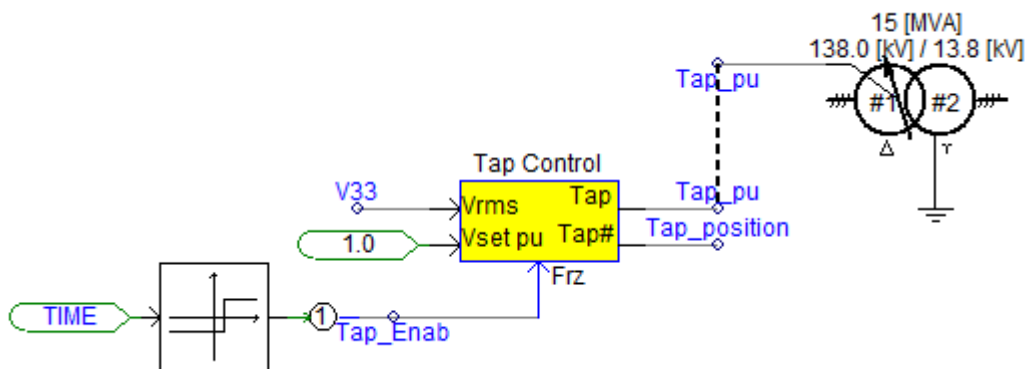


Figura 42 - Modelo de transformador com comutador de *tap* e bloco de controle.



A Figura 43 apresenta o modelo de transformador sem comutador de derivação em carga utilizado na simulação.

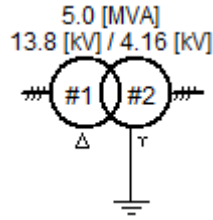


Figura 43 - Modelo de transformador sem comutador de derivação em carga.

### 4.3 CABOS

Os cabos, que conectam os transformadores aos barramentos e o barramento aos motores, foram modelados com base nas resistências, nas reatâncias indutivas e nas distâncias que determinam seus comprimentos, conforme folha de dados de projeto. A Tabela 9 apresenta os dados dos cabos modelados.

Tabela 9 - Dados dos cabos elétricos modelados.

DADOS DOS CABOS					
FORMAÇÃO	1x25 mm <sup>2</sup>	1x35 mm <sup>2</sup>	1x50 mm <sup>2</sup>	1x150 mm <sup>2</sup>	1x150 mm <sup>2</sup>
CLASSE DE TENSÃO	6/10 kV	6/10 kV	6/10 kV	12/20 kV	12/20 kV
RESISTÊNCIA (Ω/km)	0,914	0,653	0,457	0,161	0,129
REATÂNCIA (Ω/km)	0,167	0,158	0,150	0,135	0,130
AMPACIDADE (A)	158	193	239	450	513

Para modelagem dos cabos no PSCAD/EMTDC foi necessário calcular os valores da resistência série e da reatância indutiva. O cálculo da resistência série pode ser obtido através da Equação (4.1):

$$R_t = R_c \times l \quad (4.1)$$

Onde:

$R_t$  = Resistência total, em Ω;

$R_c$  = Resistência do cabo, em Ω/km;

$l$  = Distância do circuito, em km.

O cálculo da reatância indutiva é obtido através da Equação (4.2):

$$X_l = 2\pi\omega L \times l \quad (4.2)$$

Onde:

$X_l$  = Reatância indutiva total, em  $\Omega$ ;

$\omega$  = Frequência, em Hz;

$L$  = Indutância do cabo, em H/km;

$l$  = Distância do circuito, em km.

O modelo dos cabos na simulação pode ser observado conforme apresentado na Figura 44.

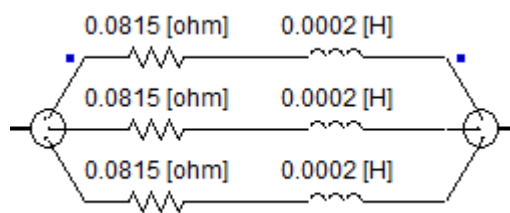


Figura 44 - Modelo dos cabos

#### 4.4 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DO CASO BASE

Este item apresenta a metodologia utilizada para a validação e análise do caso base, onde foi necessário modelar no PSCAD/EMTDC o sistema elétrico original da planta, para verificação do comportamento do sistema em aspectos de QEE. O objetivo desta simulação é verificar a validade do modelo a partir de comparação da simulação com os valores medidos em campo. Para simulação do sistema foram utilizados os valores do momento de inércia das máquinas e das cargas de acordo com os dados de projeto conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Momento de inércia dos motores e cargas.

<b>DADOS MOMENTO DE INÉRCIA</b>				
	<b>MOTOR 600 CV</b>	<b>MOTOR 850 CV</b>	<b>CARGA 1</b>	<b>CARGA 2</b>
<b>GD2 (Kgf<math>m^2</math>)</b>	121	170	706	1358

A Figura 45 apresenta o diagrama unifilar do sistema modelado, onde mostra a barra que alimenta o motor analisado. Dessa barra derivam ramais para alimentação de seis motores de diferentes potências para o acionamento dos transportadores de correia. Para um melhor entendimento do sistema, o motor analisado se encontra destacado em vermelho.

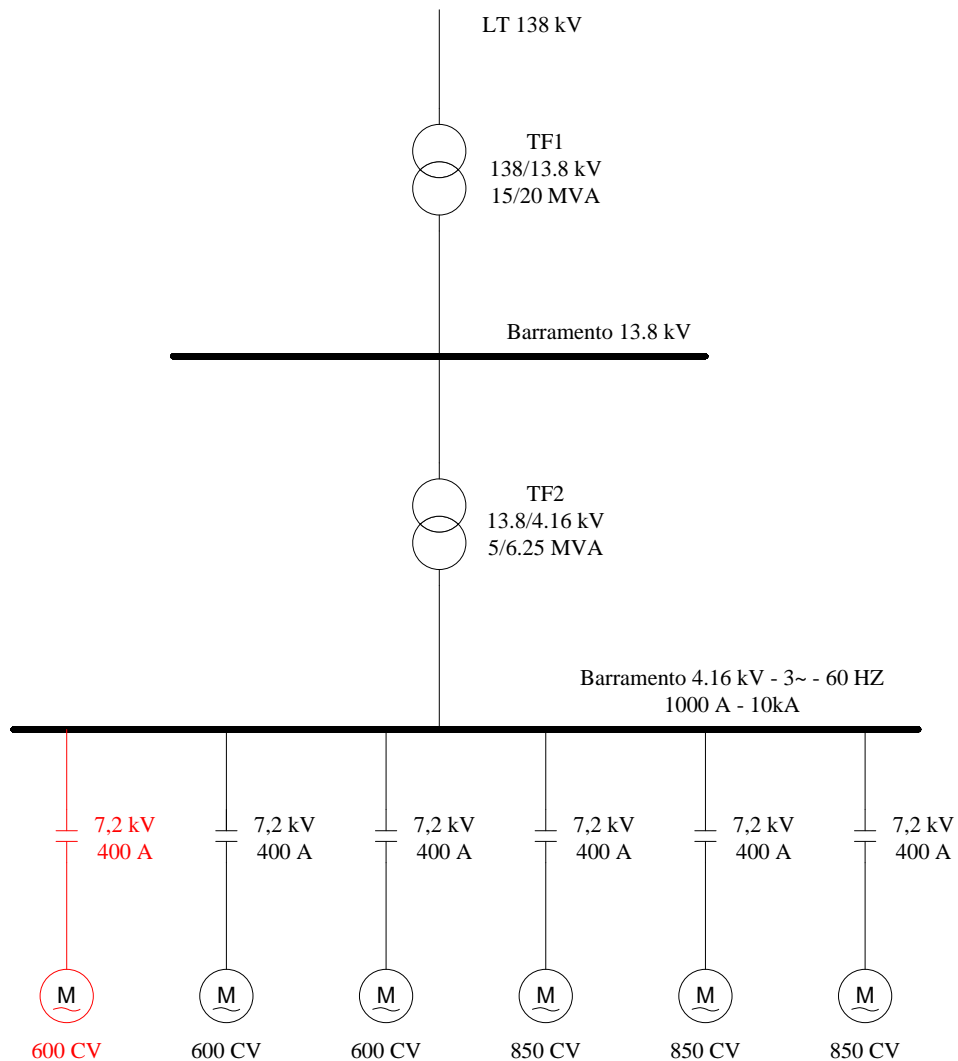


Figura 45 - Diagrama unifilar do sistema elétrico do caso base.

A modelagem do transformador principal TF1, se fez necessário devido à análise da regulação de tensão na barra de alimentação dos motores. A Figura 46 apresenta o sistema elétrico do caso base modelado no PSCAD/EMTDC.

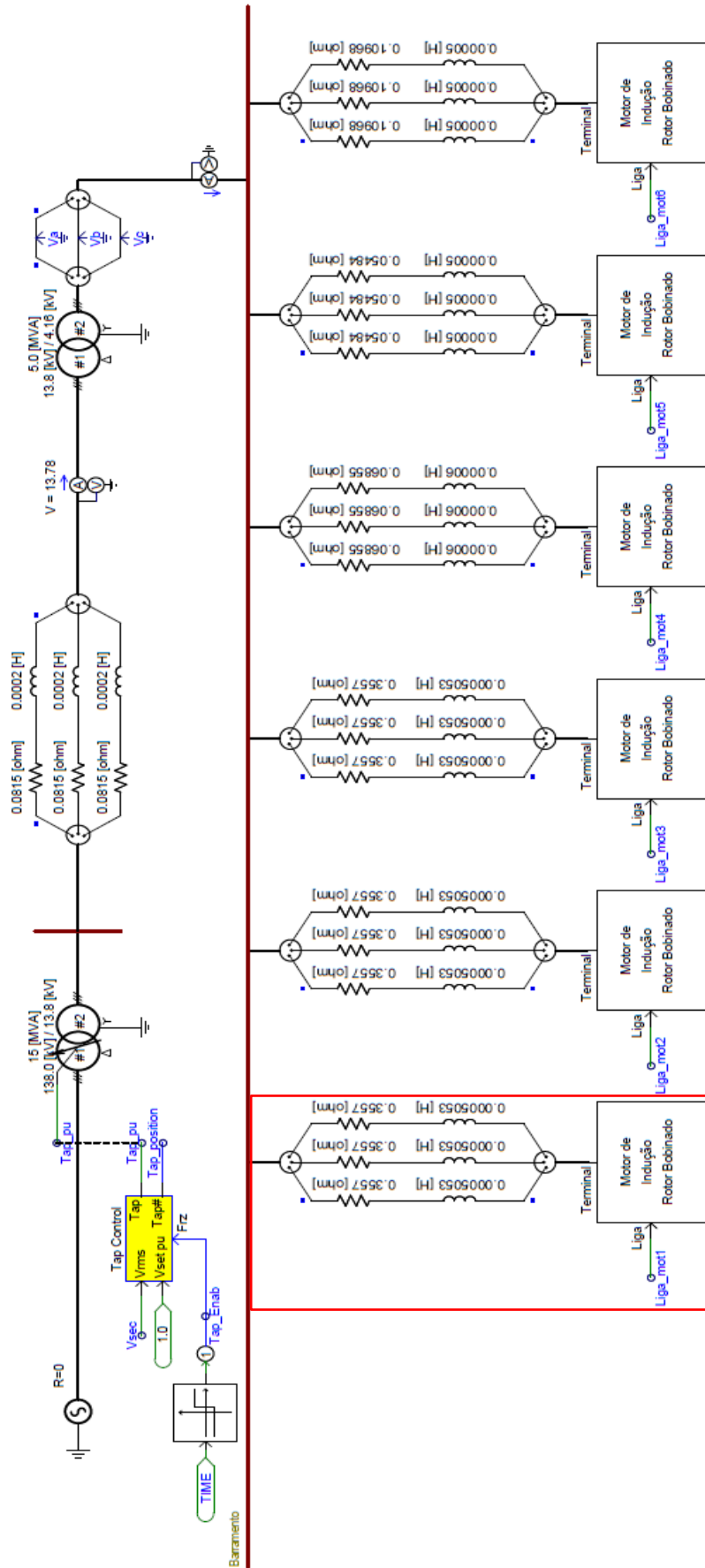


Figura 46 - Modelagem do sistema no PSCAD/EMTDC.

Para validação dos resultados, foram utilizados em todas as simulações os mesmos tempos de acionamento das máquinas e os mesmos perfis de cargas, conforme os eventos destacados na Figura 47, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa os valores coletivos de tensão em kV, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação.

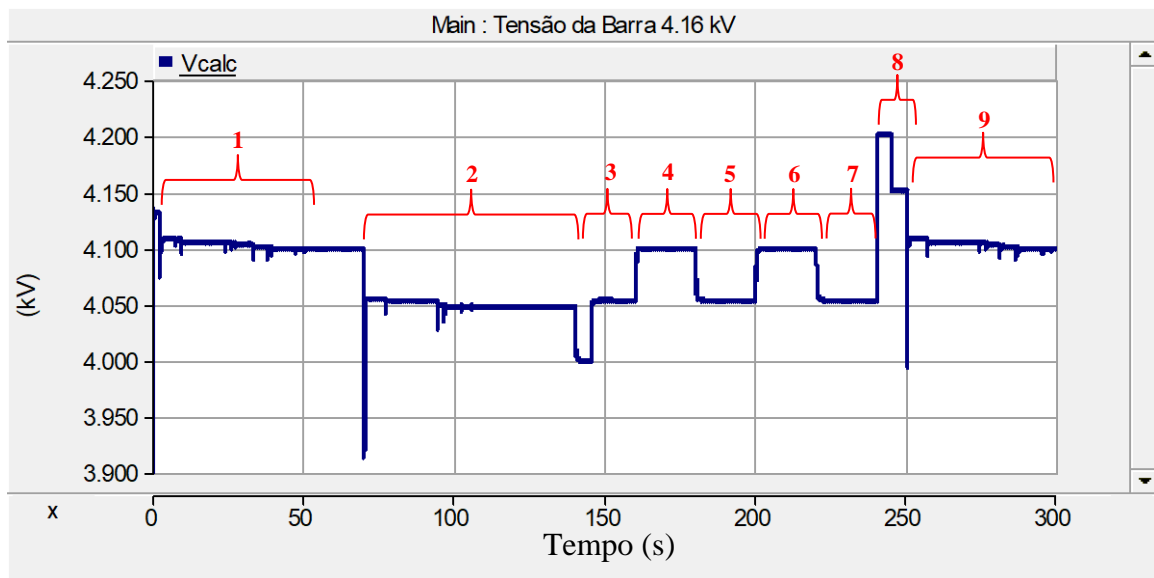


Figura 47 - Eventos de acionamentos das máquinas e perfis de carga.

Os eventos apresentados na Figura 47, serão descritos a seguir para uma melhor compreensão:

- **Evento (1):** partida do Motor 4 (850 CV) com 40% de carga;
- **Evento (2):** partida dos Motores 1 e 2 (600 CV), ambos com 50% de carga;
- **Evento (3):** aumento para 85% de carga nos Motores 1 e 2;
- **Evento (4):** redução para 50% de carga nos Motores 1 e 2;
- **Evento (5):** aumento para 85% de carga nos Motores 1 e 2;
- **Evento (6):** redução para 50% de carga nos Motores 1 e 2;
- **Evento (7):** aumento para 85% de carga nos Motores 1 e 2;
- **Evento (8):** desligamento dos Motores 1, 2 e 3;
- **Evento (9):** partida do Motor 4 com 40% de carga.

Para modelagem e validação do sistema, foi necessário ajustar a tensão da barra de 4,16 kV e a corrente do motor analisado, conforme a curva de tensão e corrente obtida nas medições realizadas em campo. A Figura 48 apresenta a curva de tensão da barra entre fases  $V_{BC}$ , onde

são exibidos conforme legenda os valores mínimos, médios e máximo durante todo o intervalo da medição analisada. O período avaliado foi realizado no dia 14 de novembro de 2018, no intervalo de 04:34h às 05:44h com tomada de dados a cada 10 segundos. Para uma melhor compreensão, foram numerados os eventos mais relevantes na curva de tensão. A Figura 48 foi obtida do *software* Power Log 5.6, onde o eixo X representa o tempo em h, e o eixo Y representa os valores de tensão entre fases em kV, obtidos durante o período de medição.

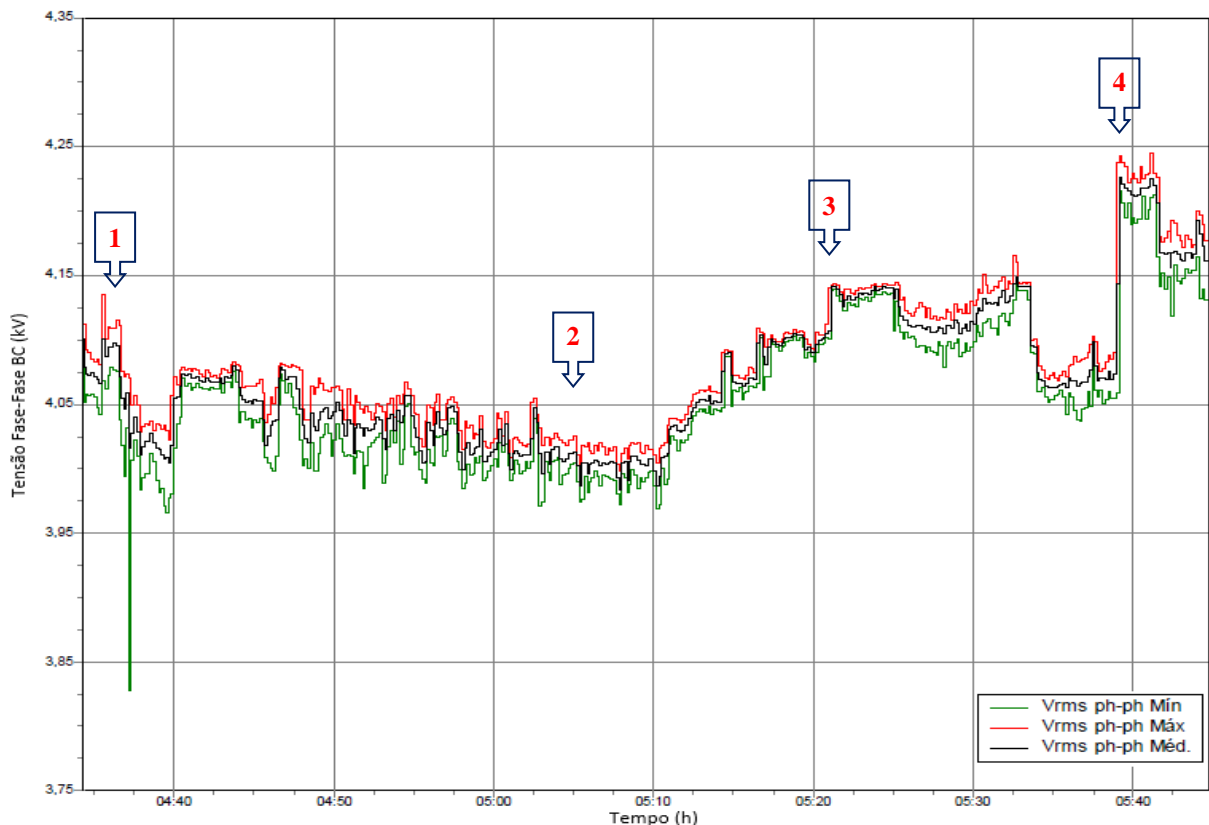


Figura 48 - Curva de tensão da barra durante período de medição.

A Figura 49 apresenta a curva de corrente do motor da fase A, onde são exibidos conforme legenda os valores mínimos, médios e máximo de corrente durante todo o intervalo da medição analisada. Para uma melhor compreensão, foram numerados os eventos mais relevantes na curva de corrente conforme apresentado na curva de tensão. A Figura 49 foi obtida do *software* Power Log 5.6, onde o eixo X representa o tempo em h, e o eixo Y representa os valores de corrente em A, obtidos durante o período de medição.

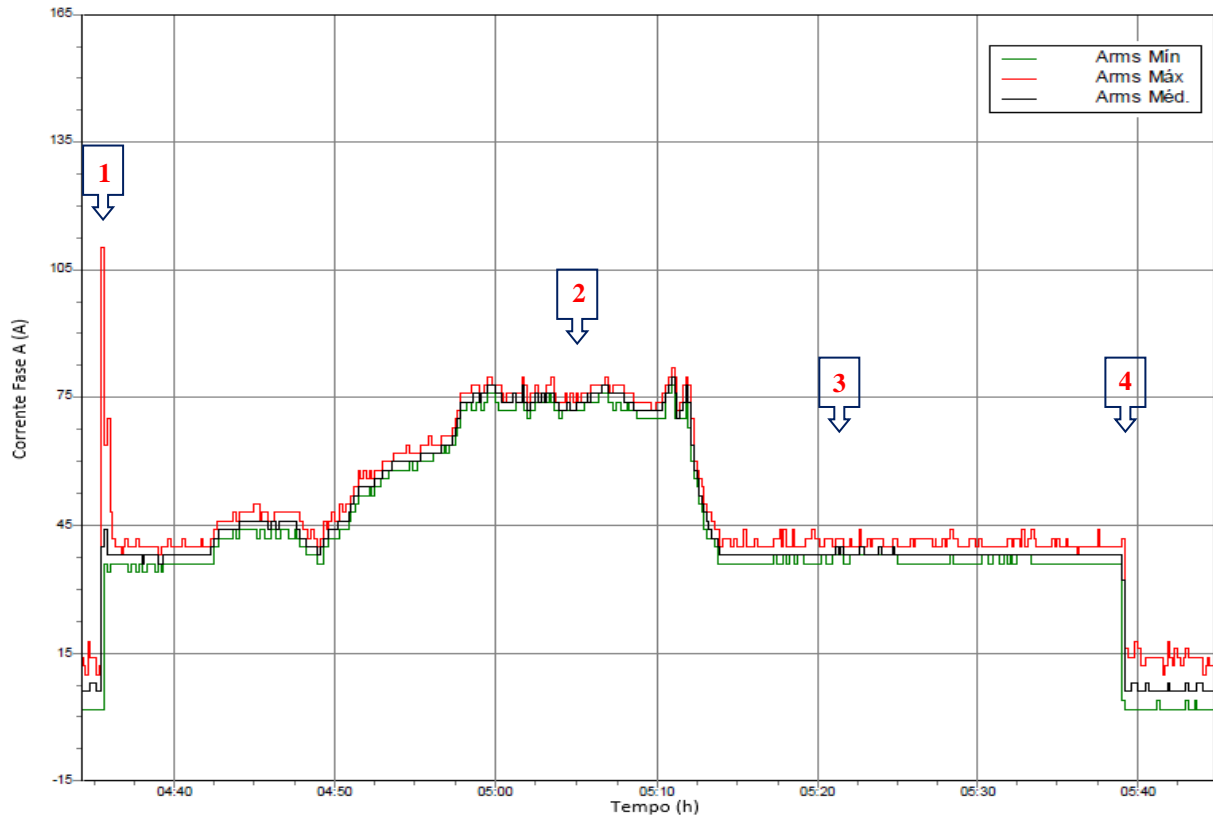


Figura 49 - Curva de corrente do motor durante período de medição.

Os eventos apresentados nas Figuras 48 e 49 também podem ser observados na simulação através dos resultados mostrados na Figura 50, obtida do *software* PSCAD/EMTDC, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa os valores coletivos de tensão em kV e a corrente em kA obtidos durante o período de simulação, sendo tipificados a seguir para validação do modelo:

- **Evento (1):** estes eventos são provocados pela partida da máquina, onde pode ser observado um afundamento de tensão da barra. Neste evento também ocorre um pico de corrente no motor de 112A;
- **Evento (2):** estes eventos são provocados pelo aumento da carga do transportador, onde pode ser observada uma redução da tensão da barra que resulta em uma tensão de 4,02 kV e no aumento da corrente do motor;
- **Evento (3):** estes eventos são provocados pela redução da carga do transportador, onde pode ser observado um aumento da tensão da barra que resulta em uma tensão de 4,14 kV e na diminuição da corrente do motor;
- **Evento (4):** estes eventos são provocados pelo desligamento abrupto de todos os motores conectados à barra, onde pode ser observado a elevação da



barra que resulta, a princípio, em uma tensão de 4,24 kV acima da nominal, e posterior regulação em uma tensão de 4,16 kV, ocasionada pela comutação de *tap* do transformador principal.

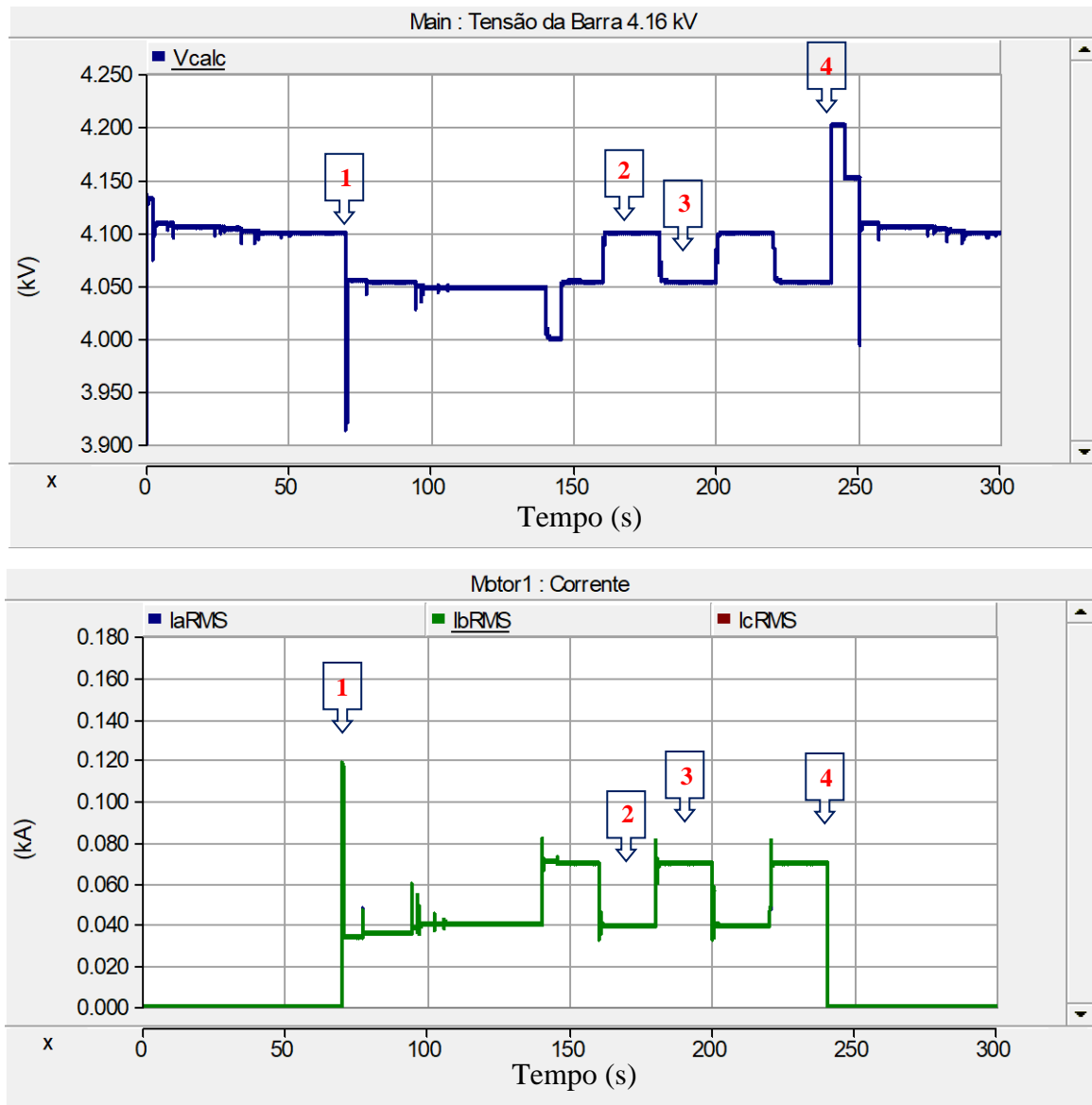


Figura 50 - Curva de tensão da barra e corrente do motor simulação PSCAD/EMTDC.

A Figura 51 foi obtida do *software* PSCAD/EMTDC e apresenta a comutação do *tap* do transformador principal durante a simulação, onde foi realizada a regulação da tensão da barra em 0,0123 pu durante o tempo de simulação. Esta comutação do *tap* pode ser observada por meio da elevação de tensão nominal da barra na medição e na simulação durante a saída abrupta dos motores, onde ambos são apresentadas no evento 4 das Figuras 48, 49 e 50. Na Figura 51, o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa o posicionamento do *tap* do transformador obtidos durante o período de simulação.

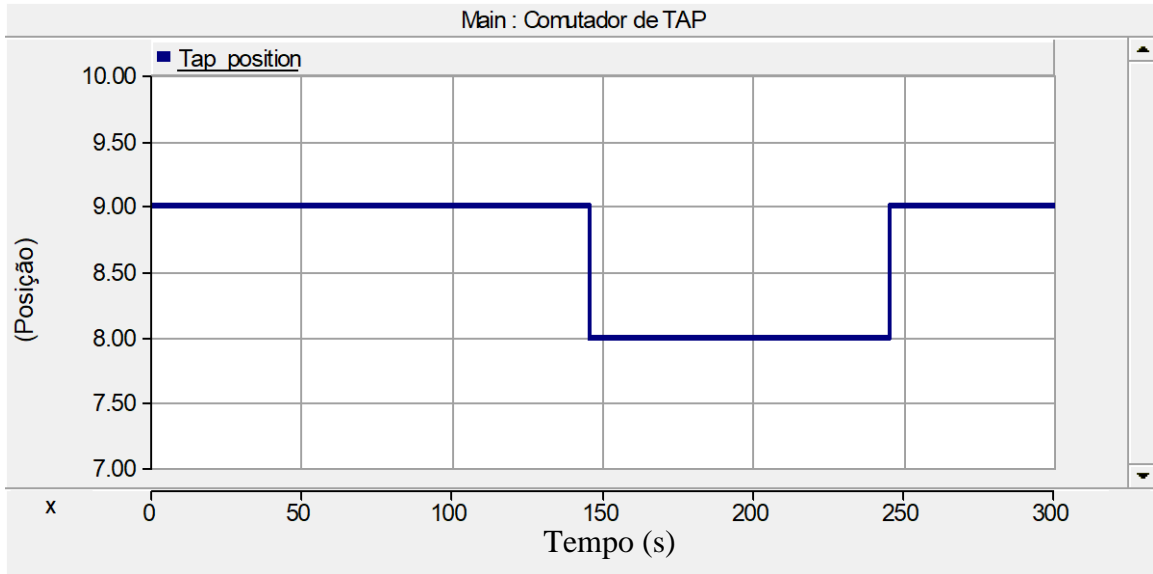


Figura 51 - Comutação do tap do transformador principal PSCAD/EMTDC.

A Figura 52 foi obtida do *software* PSCAD/EMTDC e apresenta a rampa de velocidade do motor durante a partida, onde o motor alcança a velocidade nominal no tempo total de 35,5 segundos, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu obtidos durante o período de simulação.

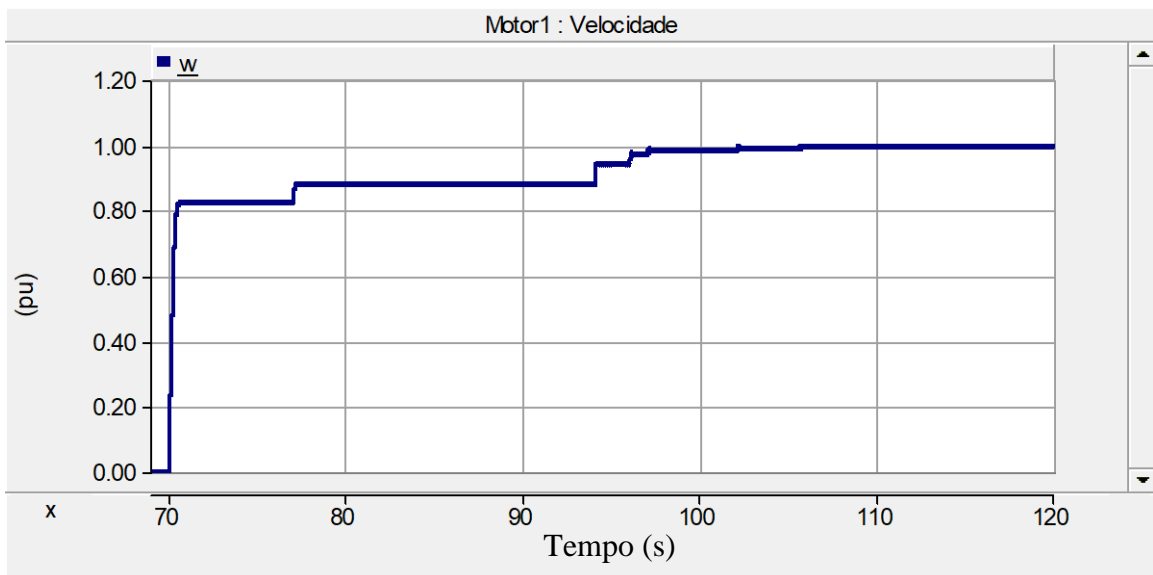


Figura 52 - Velocidade do motor durante a partida no PSCAD/EMTDC.

A comparação dos resultados de simulação com as oscilografias realizadas mostra que o perfil de resposta do sistema simulado condiz com o perfil apresentado nas oscilografias. É importante ressaltar que os dados disponíveis têm intervalo de amostragem de 10 segundos e, portanto, não permitem uma comparação do modelo com a planta para fenômenos de curta

duração. Porém, dado que foi feito o uso dos parâmetros de projeto utilizados na modelagem do sistema e a sua validação na análise de fenômenos de média e longa duração, será considerado o modelo satisfatório também para a abordagem em análises de fenômenos de curta duração.

## 5 APLICAÇÕES DAS SOLUÇÕES

Neste item serão apresentadas as metodologias para aplicação das soluções propostas para o caso base, e suas respectivas análises do comportamento da implementação de cada solução.

### 5.1 APLICAÇÃO DO *SOFT-STARTER*

Para a análise e verificação da implementação do *soft-starter* como solução proposta para partida dos motores, foi realizado a modelagem do MITRB conectado ao *soft-starter*. A Figura 53 apresenta o modelo utilizado na simulação.

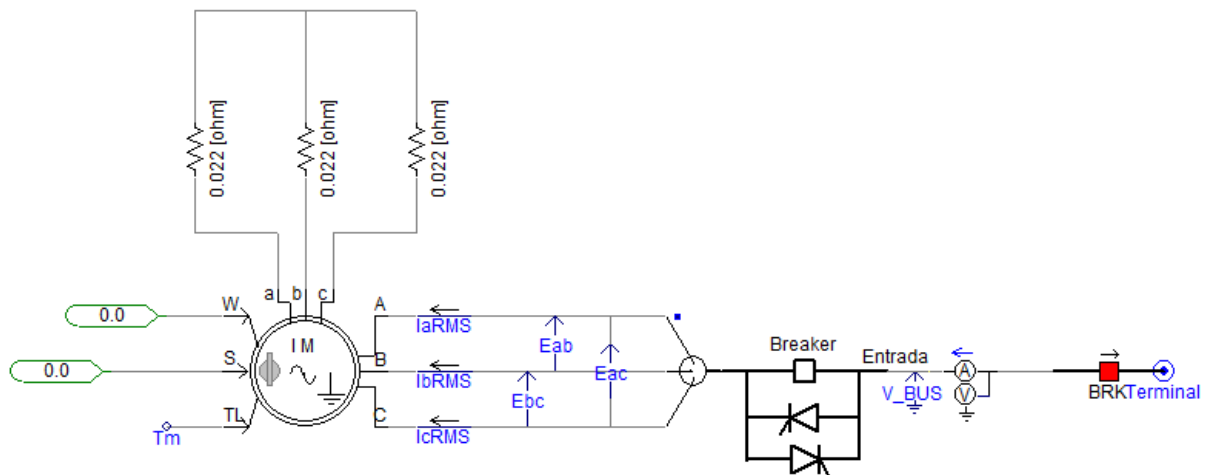


Figura 53 - Modelo *soft-starter* simulado no PSCAD/EMTDC.

Neste primeiro caso será avaliado o comportamento da partida do motor com o *soft-starter* exclusivamente conectado, sendo mantido apenas a resistência fixa no rotor, ou seja, retiradas as resistências que são postas em curto circuito no processo de energização do motor. O tempo configurado para realização da rampa de aceleração é de 40 segundos. A Figura 54 foi obtida do *software* PSCAD/EMTDC e apresenta a curva de velocidade, torque, corrente e tensão do motor durante a partida, onde o eixo X representa o tempo em s e o eixo Y representa a velocidade e o torque em pu, a corrente em kA e a tensão em kV, obtidos durante o período de simulação.

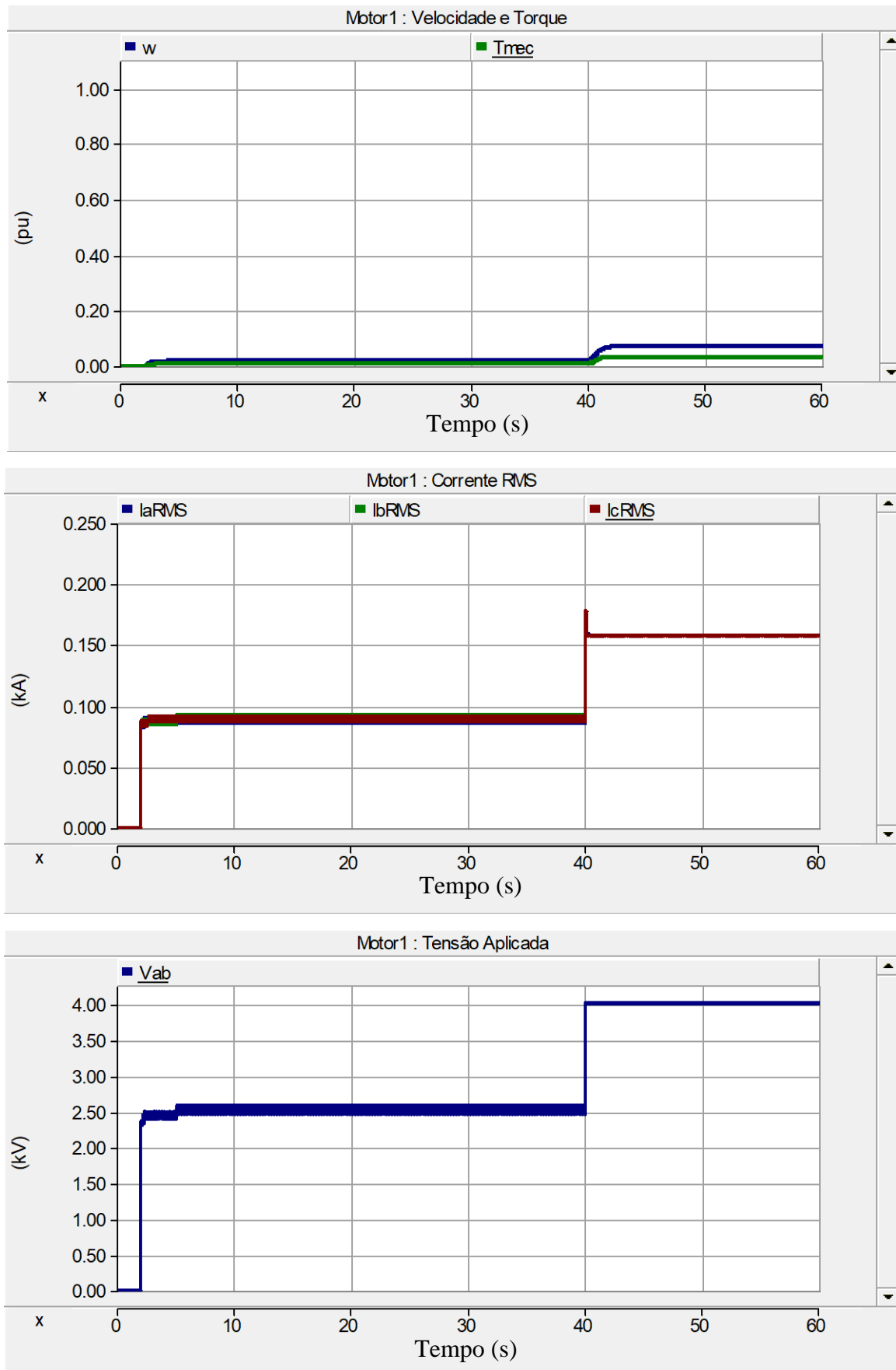


Figura 54 - Curva de velocidade, torque, corrente e tensão do motor com *soft-starter*.

No resultado apresentado na Figura 54, foi possível observar que o motor não atinge a velocidade nominal, ou seja, não vence o torque de partida, devido à remoção do banco de resistências rotóricas e instalação do *soft-starter*, onde é reduzida a tensão aplicada e o torque do motor durante a partida. O perfil da corrente do motor também é apresentado, onde além do pico de corrente de 180 A, a mesma se mantém com a corrente elevada de 159 A, acima da nominal de 80,2 A.

Para uma análise mais detalhada da partida do motor, a Figura 55 apresenta a simulação da partida direta do acionamento, retirando totalmente as resistências rotóricas para observação do seu comportamento, onde pode ser observado que mesmo aplicando a tensão a plena carga, não foi obtido êxito na partida do motor devido ao seu elevado torque de partida de 3.344 Nm. A Figura 55 foi obtida do *software* PSCAD/EMTDC e apresenta a curva de velocidade, torque, corrente e tensão do motor durante a partida, onde o eixo X representa o tempo em s e o eixo Y representa a velocidade e o torque em pu, a corrente em kA e a tensão em kV, obtidos durante o período de simulação.

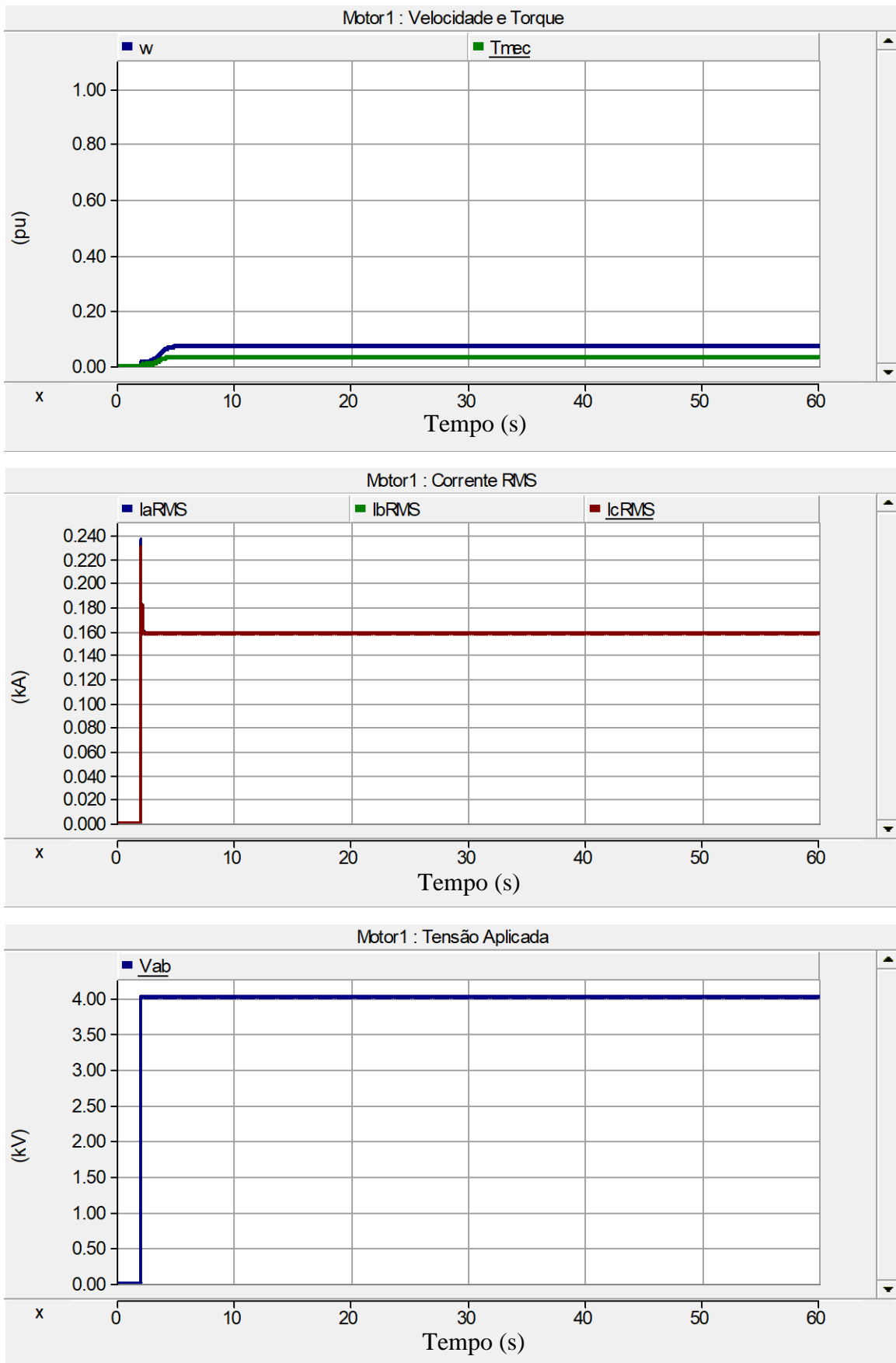


Figura 55 - Curva de velocidade, torque, corrente e tensão do motor com partida direta.

Neste item pôde ser observado que a implementação do *soft-starter* exclusivamente conectado para partida do motor não é suficiente para vencer o torque de partida da máquina, onde fica caracterizado a inviabilidade da aplicação deste modelo apresentado. Portanto será simulado no segundo caso um modelo com ação combinada para partida do motor.

### 5.1.1 APLICAÇÃO DA AÇÃO COMBINADA SOFT-STARTER E BANCO DE RESISTÊNCIA

Conforme apresentado no item 5.1, foi verificado a inviabilidade da utilização exclusiva do *soft-starter* para partida do motor. Portanto, neste segundo caso será avaliado o comportamento da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência para a partida do motor.

Para essa análise, foi realizada a modelagem do MITRB mantendo a inserção total do banco de resistência, conforme apresentado no caso base, e conectando o *soft-starter*. A Figura 56 apresenta o modelo utilizado na simulação do segundo caso.

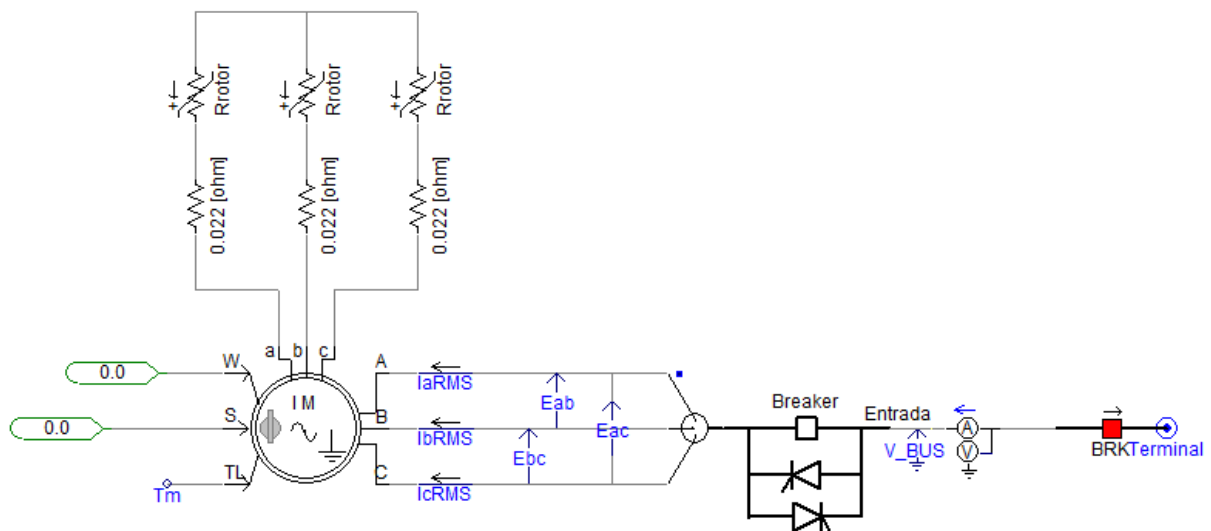


Figura 56 - Modelo ação combinada *soft-starter* e banco de resistência.

A metodologia utilizada para definir ângulo de disparo dos tiristores, foi realizada com base na observação dos resultados obtidos do perfil de corrente do motor em simulação, ajustando o ângulo de disparo para atenuar os picos de corrente durante a partida sem prejudicar o torque de partida e o tempo de aceleração da máquina. A Tabela 11 apresenta o ângulo de disparo definido para cada respectiva velocidade durante a rampa de partida.



Tabela 11 - Configuração do ângulo de disparo dos tiristores.

<b>ÂNGULO DE DISPARO <i>VERSUS</i> VELOCIDADE</b>	
<b>VELOCIDADE (pu)</b>	<b>ÂNGULO (Graus)</b>
0,0	110
0,1	100
0,2	100
0,3	80
0,4	70
0,5	55
0,6	35
0,7	25
0,8	20
0,9	15

### **5.1.2 AVALIAÇÃO DA AÇÃO COMBINADA SOFT-STARTER E BANCO DE RESISTÊNCIA 50% DE CARGA**

As Figuras 57 e 58, foram obtidas do software PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de corrente do motor com partida rotórica e partida com ação combinada, respectivamente, com 50% de carga, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a corrente em kA, obtidos durante o período de simulação.

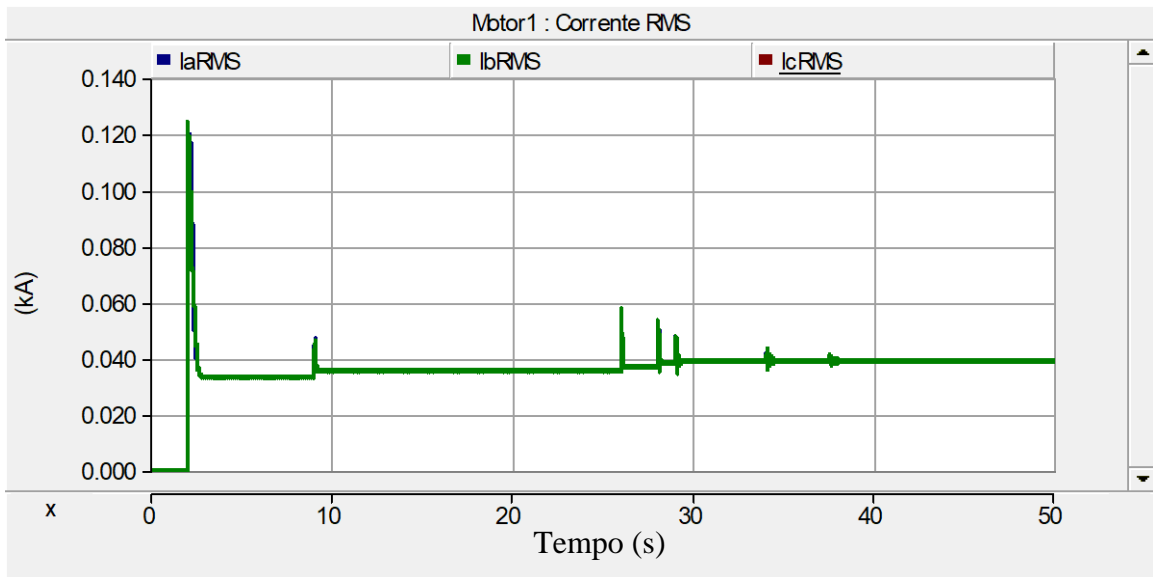


Figura 57 - Perfil de corrente partida rotórica com 50% de carga.

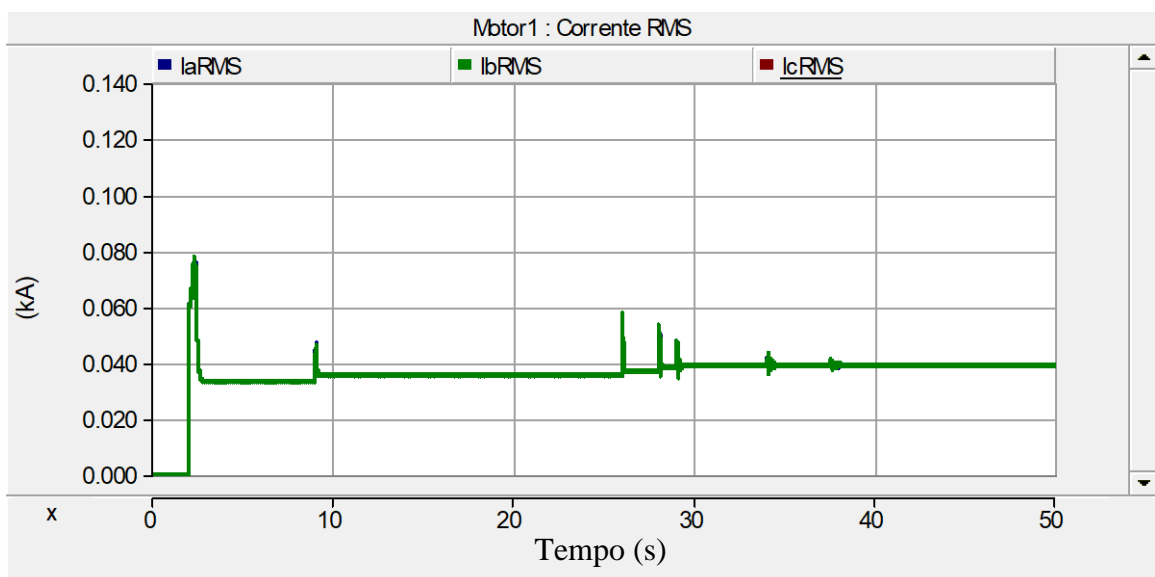


Figura 58 - Perfil de corrente ação combinada com 50% de carga.

Realizando um comparativo entre os perfis de corrente para carga de 50% apresentados nas Figuras 57 e 58, pôde ser observado que a aplicação da ação combinada, com banco de resistência e *soft-starter*, para partida do motor apresenta uma redução de 38,47% do pico de corrente na partida, onde se pode avaliar que a implementação desta solução é viável para mitigação da corrente de pico na partida do motor.

Um ponto também avaliado é se a implementação da ação combinada ocasiona alguma alteração no tempo de aceleração da máquina. As Figuras 59 e 60 apresentam a rampa de aceleração com partida rotórica e ação combinada, respectivamente, onde o eixo X representa

o tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação.

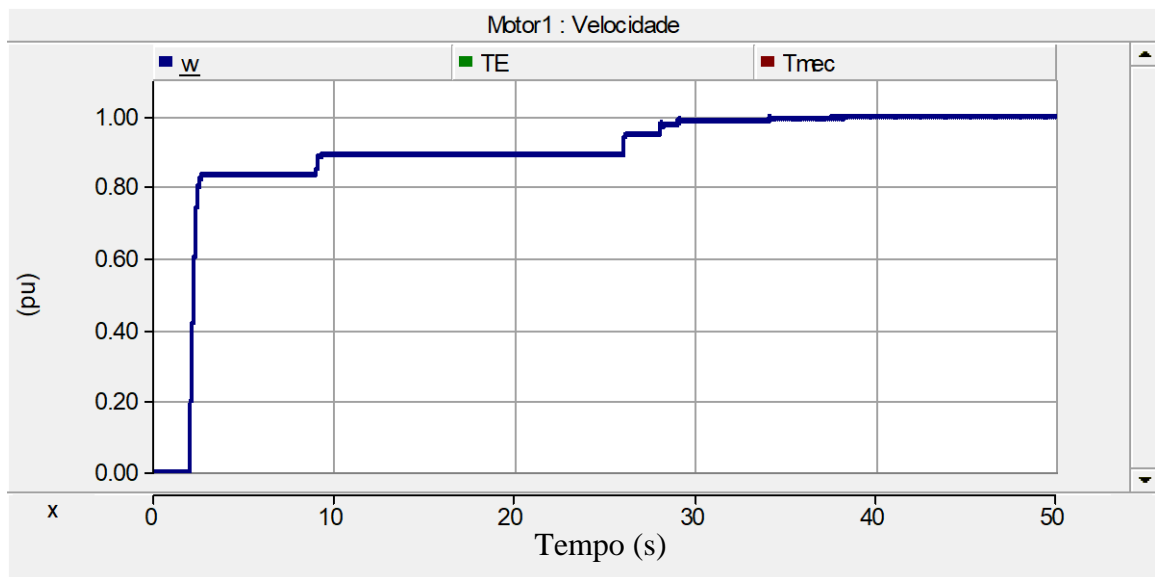


Figura 59 - Rampa de aceleração partida rotórica com 50% da carga.

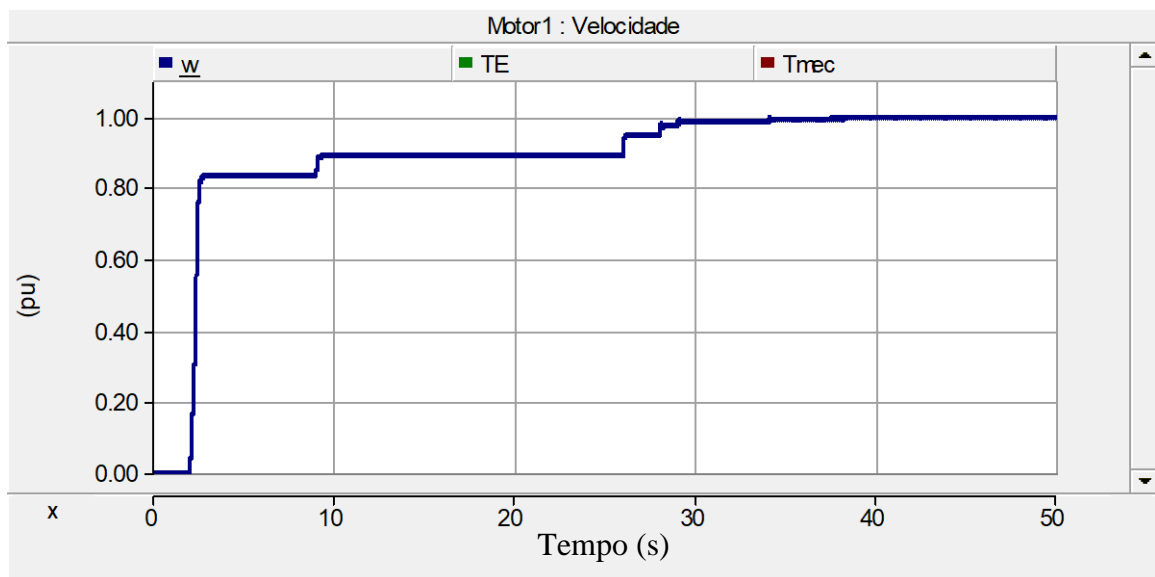


Figura 60 - Rampa de aceleração ação combinada com 50% da carga.

Para uma análise mais detalhada, foi aplicado um *zoom* na rampa de aceleração da partida rotórica e ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência, conforme apresentado nas Figuras 61 e 62, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação. Pode ser observado que a implementação da ação combinada ocasiona um pequeno atraso de 100 ms no

tempo de partida da máquina até 80% da velocidade nominal, porém é mantido o mesmo perfil da partida rotórica.

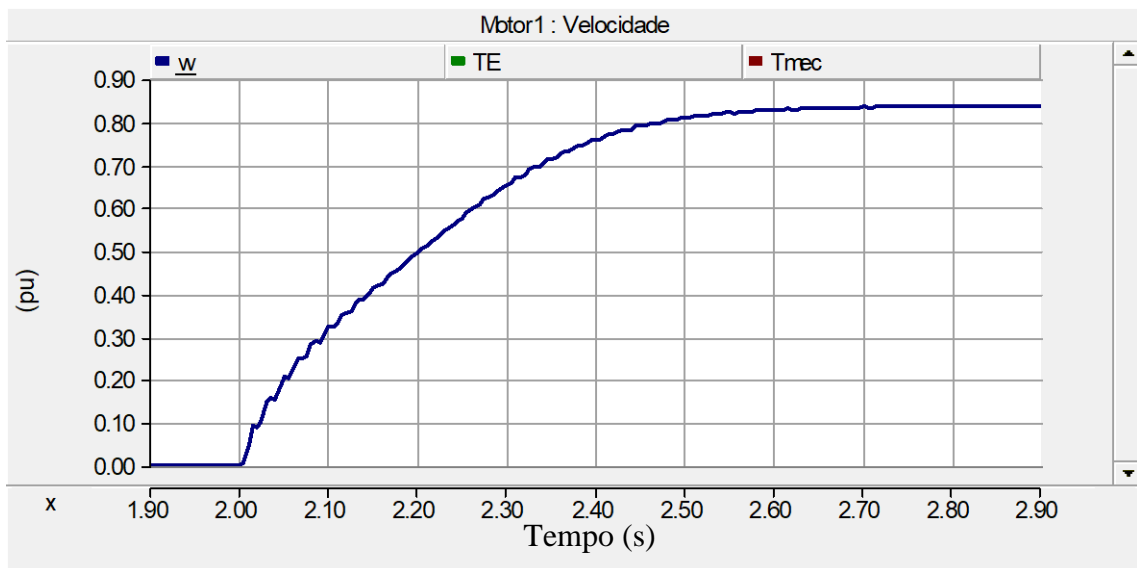


Figura 61 - Zoom na rampa de aceleração partida rotórica com 50% da carga.

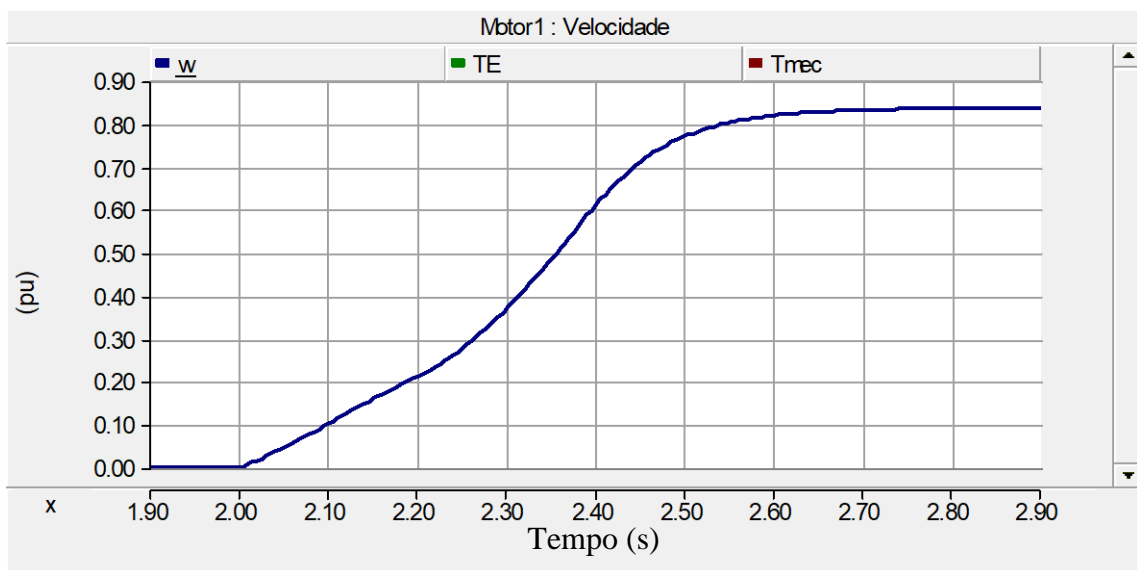


Figura 62 - Zoom na rampa de aceleração ação combinada com 50% da carga.

### 5.1.3 AVALIAÇÃO DA AÇÃO COMBINADA *SOFT-STARTER* E BANCO DE RESISTÊNCIA 75% DE CARGA

As Figuras 63 e 64, foram obtidas do *software* PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de corrente do motor com partida rotórica e partida com ação combinada, respectivamente,

ambos com 75% de carga, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a corrente em kA, obtidos durante o período de simulação.

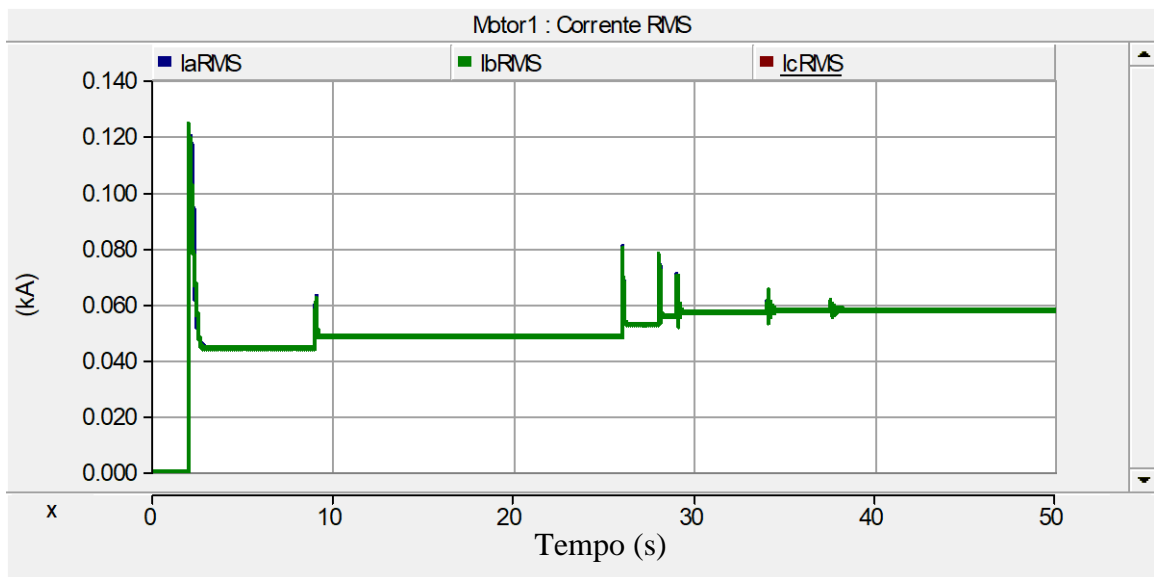


Figura 63 - Perfil de corrente partida rotórica com 75% de carga.

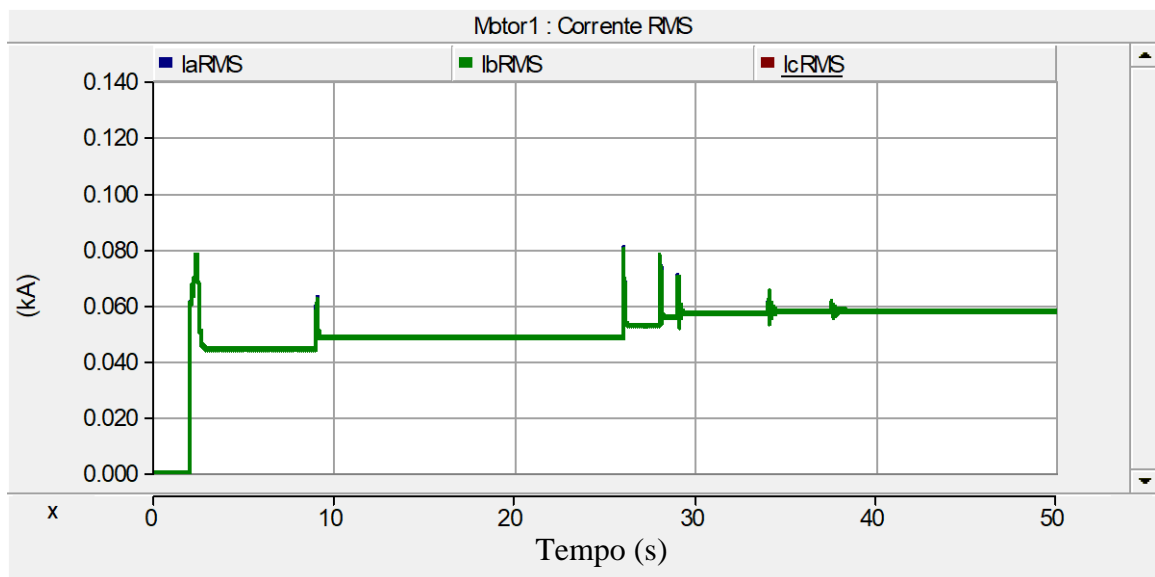


Figura 64 - Perfil de corrente ação combinada com 75% de carga.

Na análise comparativa dos perfis de corrente do motor apresentado nas Figuras 63 e 64, pôde ser observado que a implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência para carga de 75%, também apresenta uma redução considerável, sendo de 39% do pico de corrente durante a partida do motor.

As Figuras 65 e 66, apresentam a rampa de aceleração com partida rotórica e ação combinada de *soft-starter* e banco de resistência, respectivamente, onde o eixo X representa o

tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação.

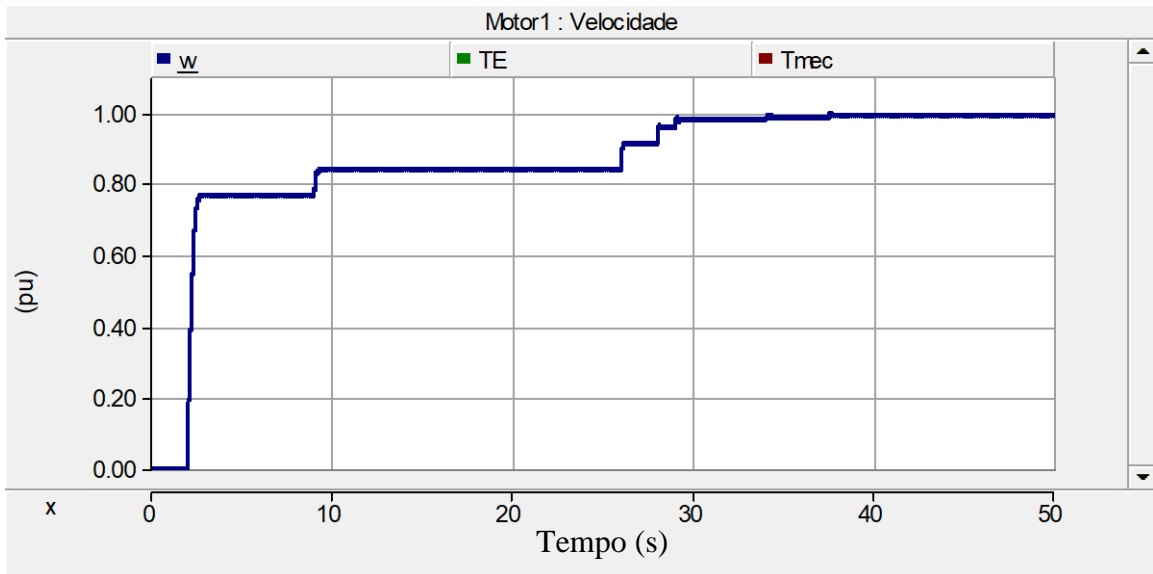


Figura 65 - Rampa de aceleração partida rotórica com 75% da carga.

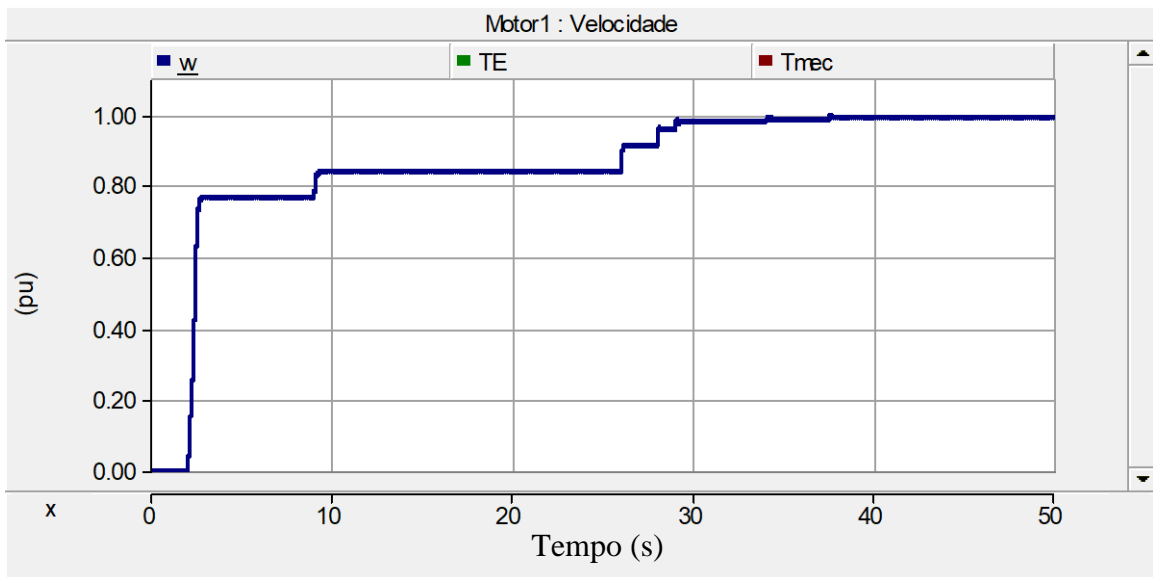


Figura 66 - Rampa de aceleração ação combinada com 75% da carga.

Para uma análise mais detalhada, foi aplicado um *zoom* na rampa de aceleração da partida rotórica e ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência, conforme apresentado nas Figuras 67 e 68, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação. Pode ser observado que a implementação da ação combinada ocasiona um pequeno atraso de 150 ms no

tempo de partida da máquina até 70% da velocidade nominal, porém é mantido o mesmo perfil da partida rotórica.

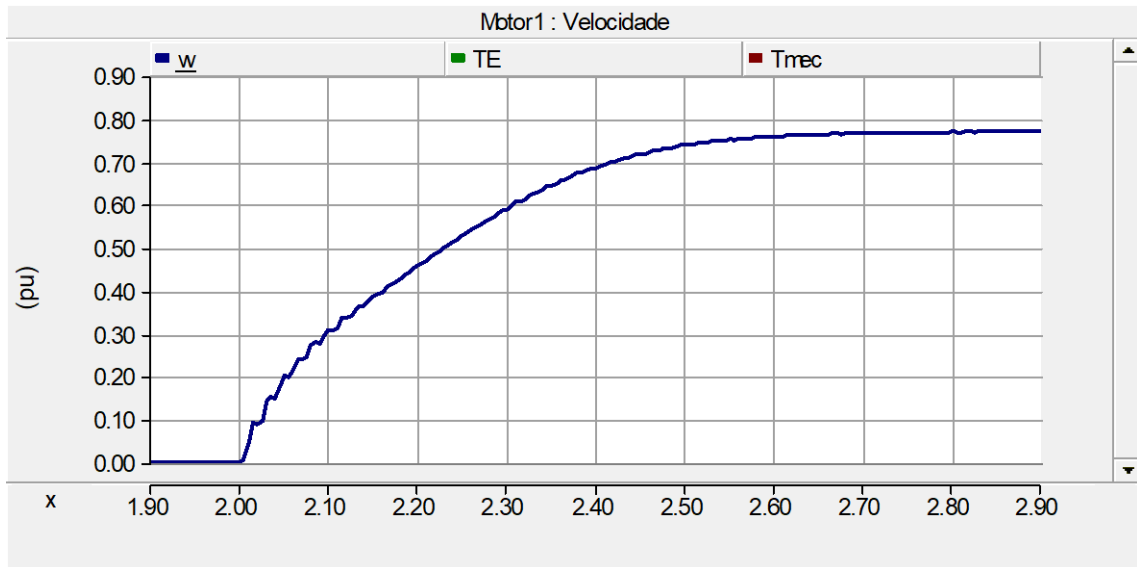


Figura 67 - Zoom na rampa de aceleração partida rotórica com 75% da carga.

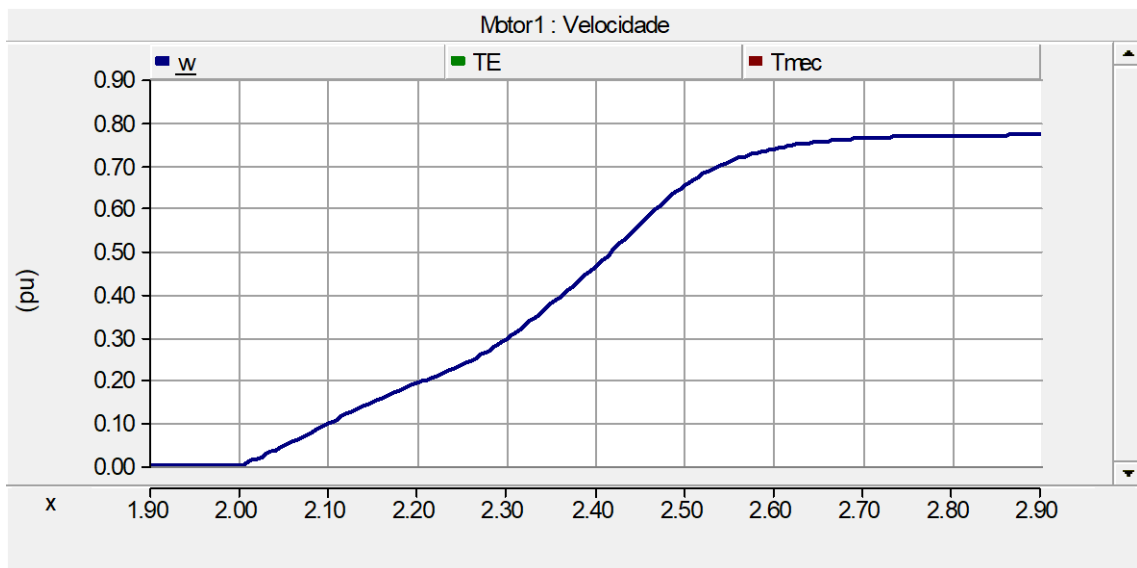


Figura 68 - Zoom na rampa de aceleração ação combinada com 75% da carga.

#### 5.1.4 AVALIAÇÃO DA AÇÃO COMBINADA *SOFT-STARTER* E BANCO DE RESISTÊNCIA 100% DE CARGA

As Figuras 69 e 70, foram obtidas do *software* PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de corrente do motor com partida rotórica e partida com ação combinada, respectivamente,

ambos com 100% de carga, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a corrente em kA, obtidos durante o período de simulação.

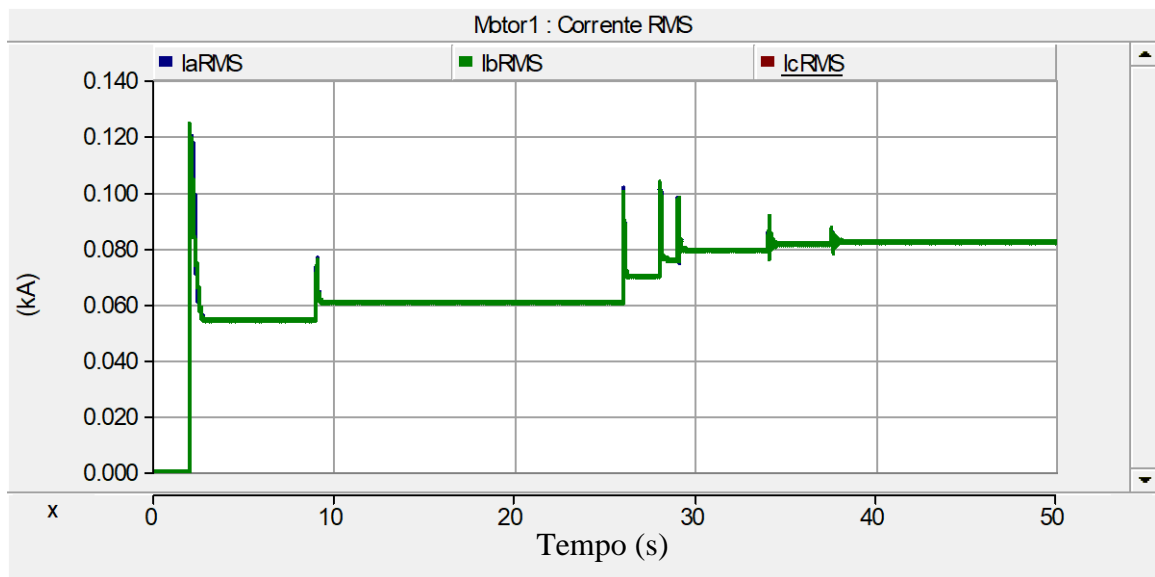


Figura 69 - Perfil de corrente partida rotórica com 100% de carga.

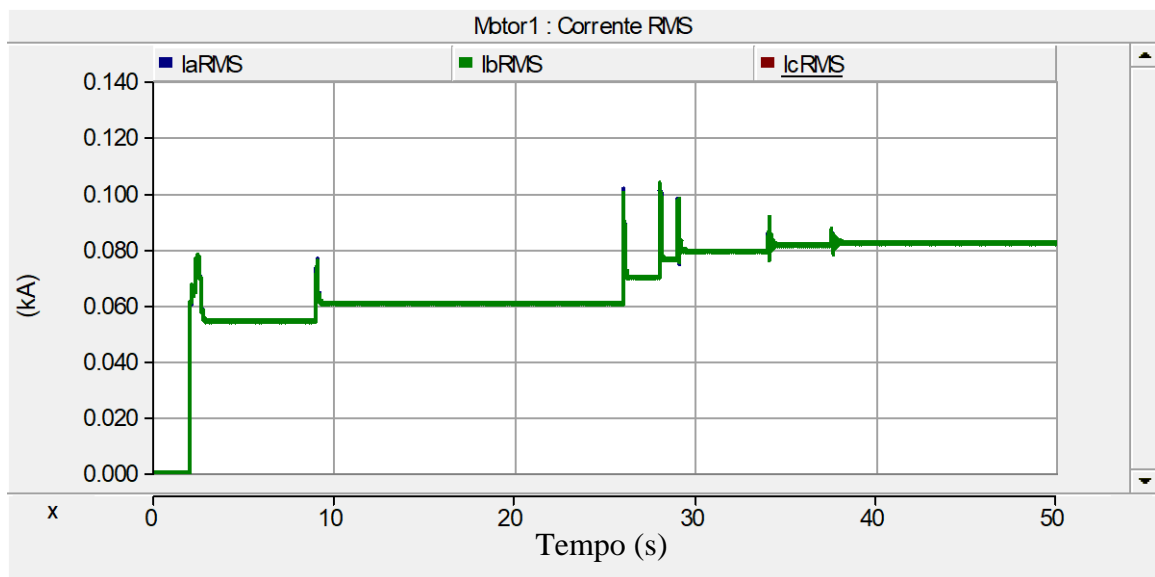


Figura 70 - Perfil de corrente ação combinada com 100% de carga.

Na análise comparativa dos perfis de corrente do motor apresentado nas Figuras 69 e 70, pôde ser observado que a implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência para carga de 100%, também apresenta uma redução considerável, sendo de 40,32% do pico de corrente durante a partida do motor.

As Figuras 71 e 72, apresentam a rampa de aceleração com partida rotórica e ação combinada de *soft-starter* e banco de resistência, respectivamente, onde o eixo X representa o



tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação.

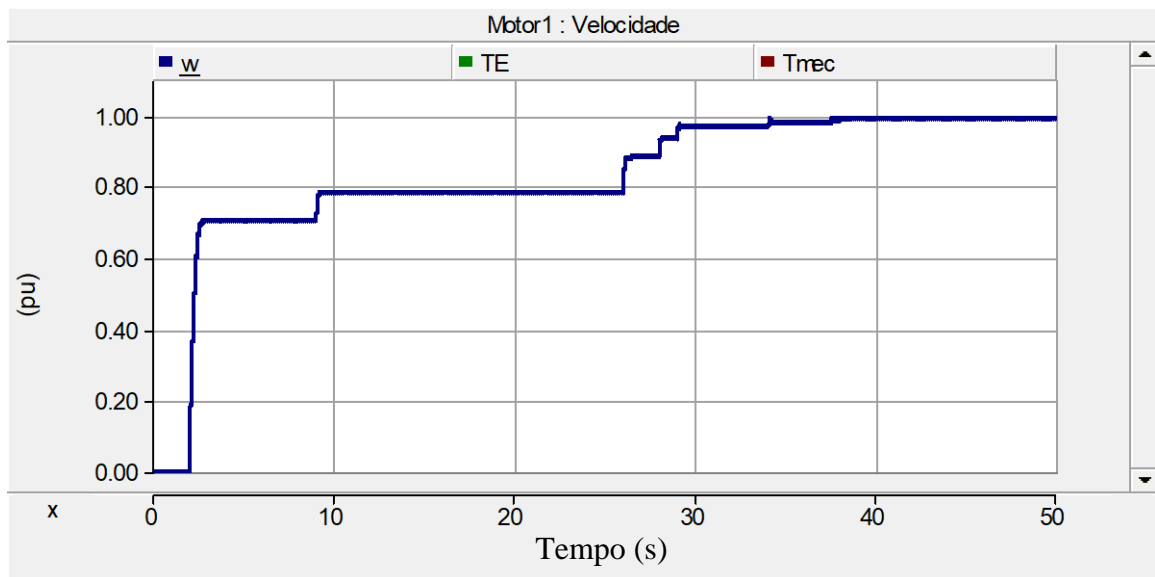


Figura 71 - Rampa de aceleração partida rotórica com 100% da carga.

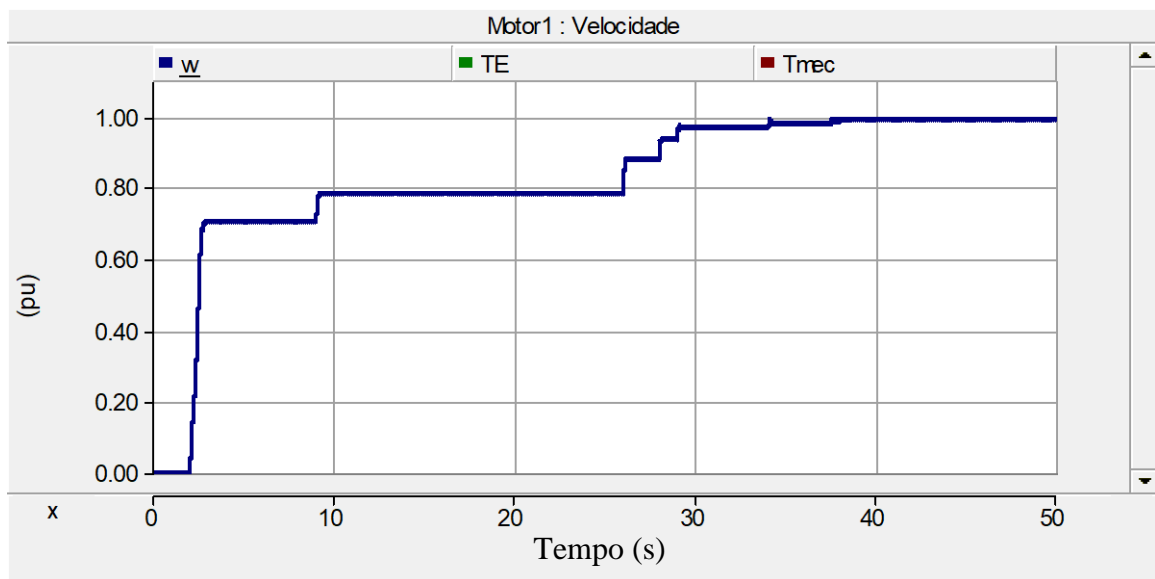


Figura 72 - Rampa de aceleração ação combinada com 100% da carga.

Para uma análise mais detalhada, foi aplicado um *zoom* na rampa de aceleração da partida rotórica e ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência, conforme apresentado nas Figuras 73 e 74, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação. Pode ser observado que a implementação da ação combinada ocasiona um pequeno atraso de 100 ms no

tempo de partida da máquina até 70% da velocidade nominal, porém é mantido o mesmo perfil da partida rotórica.

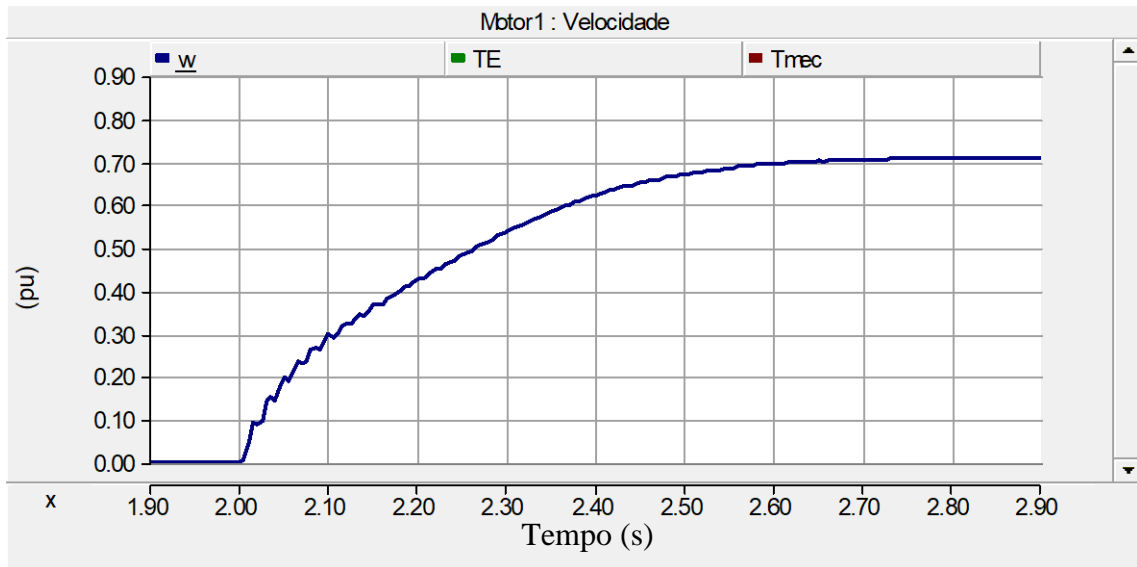


Figura 73 - Zoom na rampa de aceleração partida rotórica com 100% da carga.

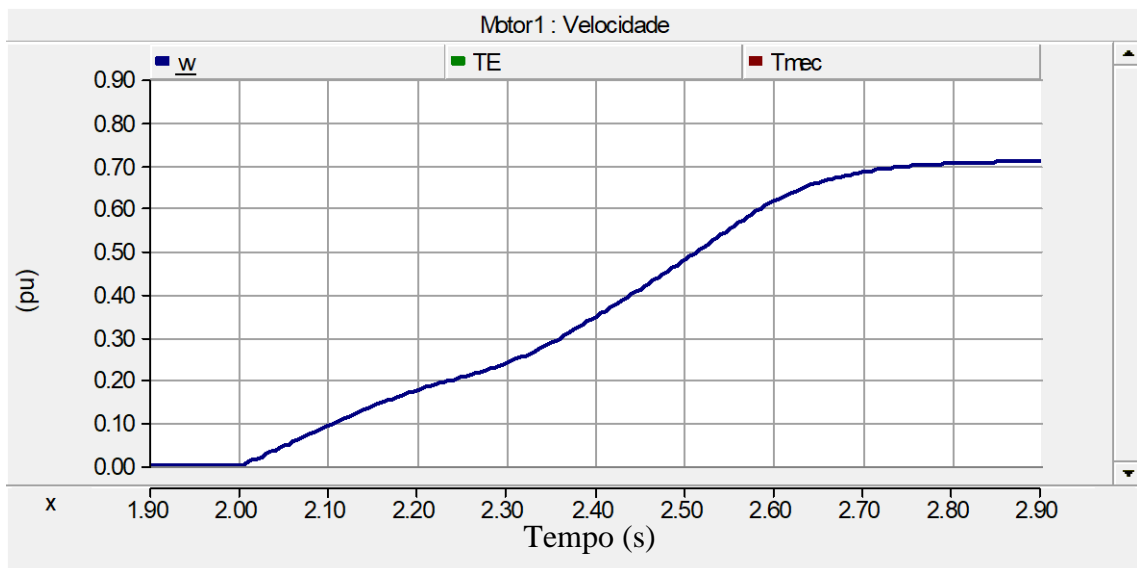


Figura 74 - Zoom na rampa de aceleração ação combinada com 100% da carga.

### 5.1.5 AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA AÇÃO COMBINADA *SOFT-STARTER* E BANCO DE RESISTÊNCIA NA BARRA DE 4,16 KV

A avaliação dos resultados da aplicação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência nos três níveis de carga, conforme apresentados nos itens 5.1.2, 5.1.3 e 5.1.4, apresentam resultados positivos de forma individual. Porém, neste item será realizado a análise

comparativa entre os resultados obtidos no caso base e na implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência de forma coletiva, através da análise na barra de 4.16 kV com a aplicação da solução em todos os motores, onde será avaliado o perfil de tensão da barra, a corrente e a rampa de partida do motor.

As Figuras 75 e 76, foram obtidas do *software* PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de tensão da barra de 4,16 kV, através dos resultados do valor coletivo de tensão com a implementação do caso base com partida rotórica e da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a tensão em kV.

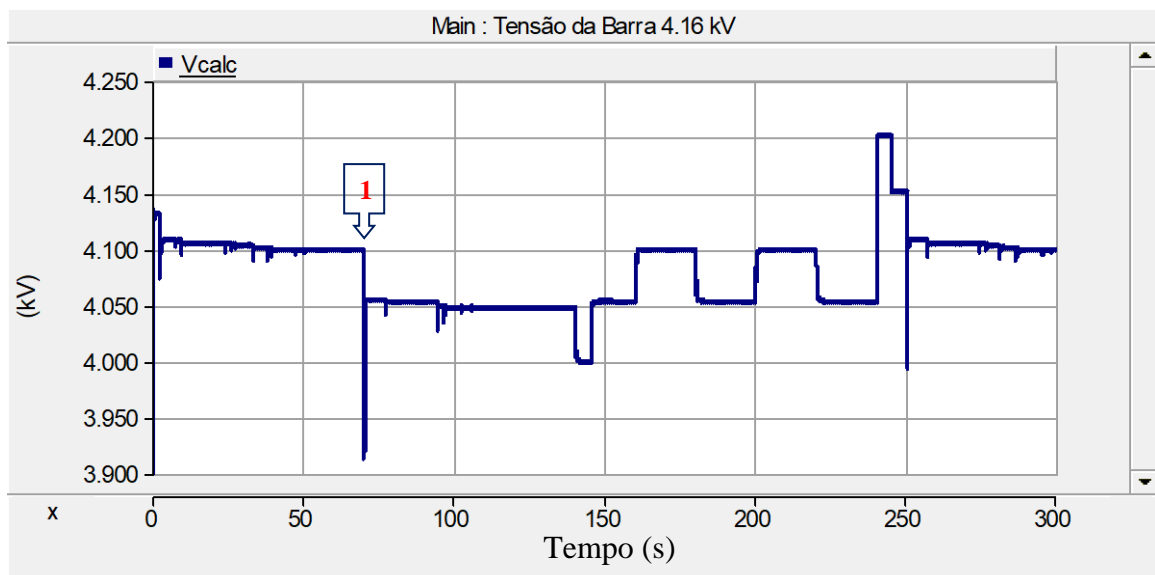


Figura 75 - Perfil de tensão da barra de 4.16 kV com partida rotórica.

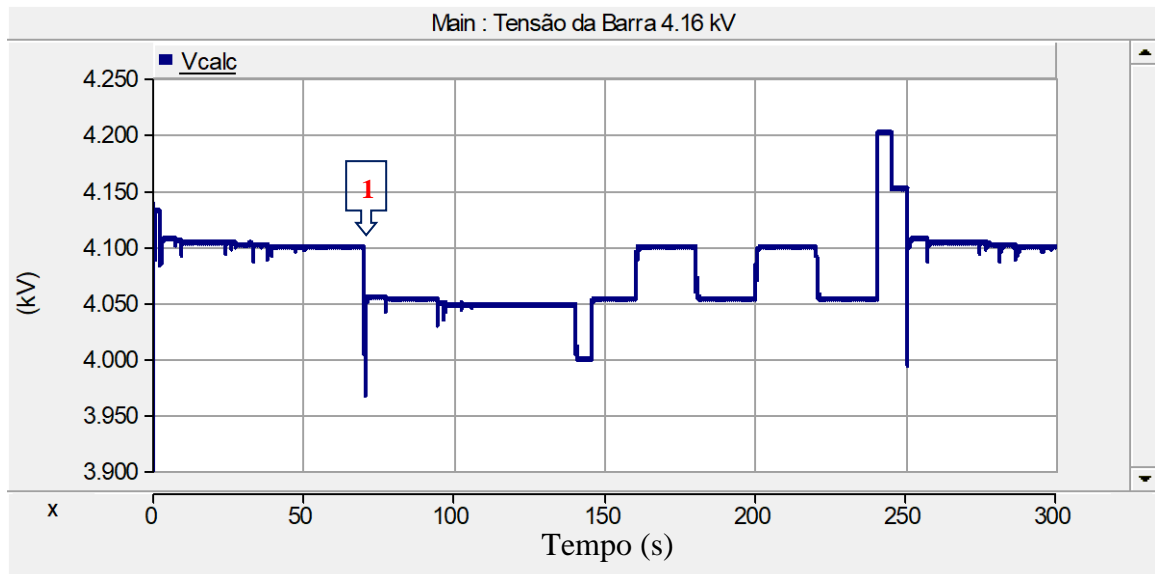


Figura 76 - Perfil de tensão da barra de 4.16 kV com ação combinada soft-starter e banco de resistência

Na análise do evento 1, conforme destacado nas Figuras 75 e 76, pode ser observado uma redução no afundamento de tensão com a aplicação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência em comparação com o caso base. Para uma análise mais detalhada, foi aplicado um *zoom* neste evento no perfil de tensão da barra de 4,16 kV com ação combinada e caso base, conforme apresentado nas Figuras 77 e 78, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa o valor coletivo de tensão em kV.

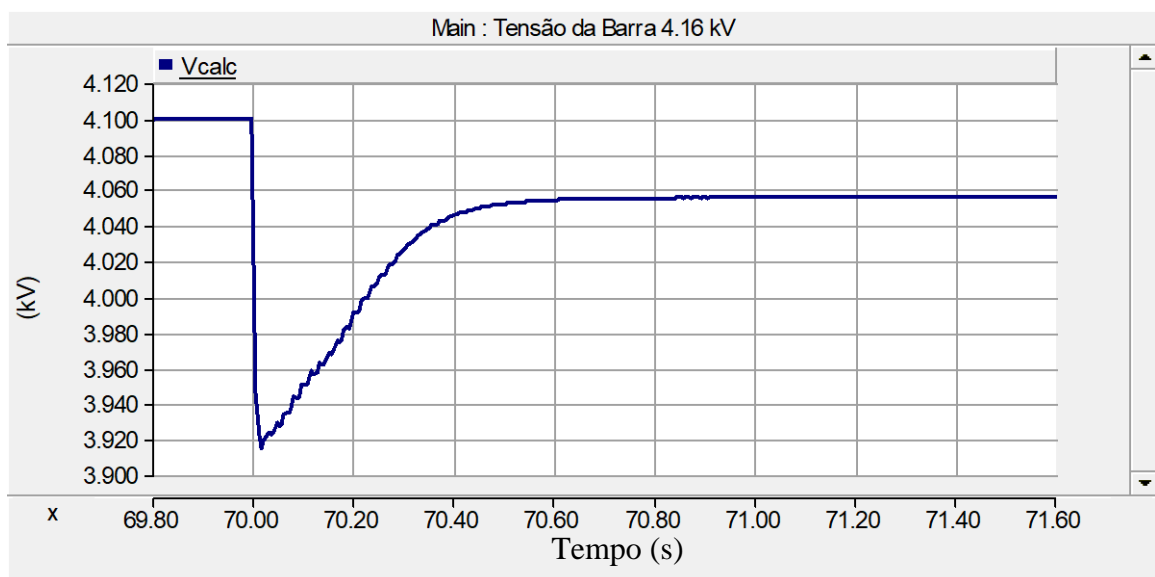


Figura 77 - Afundamento de tensão na barra 4,16 kV caso base.

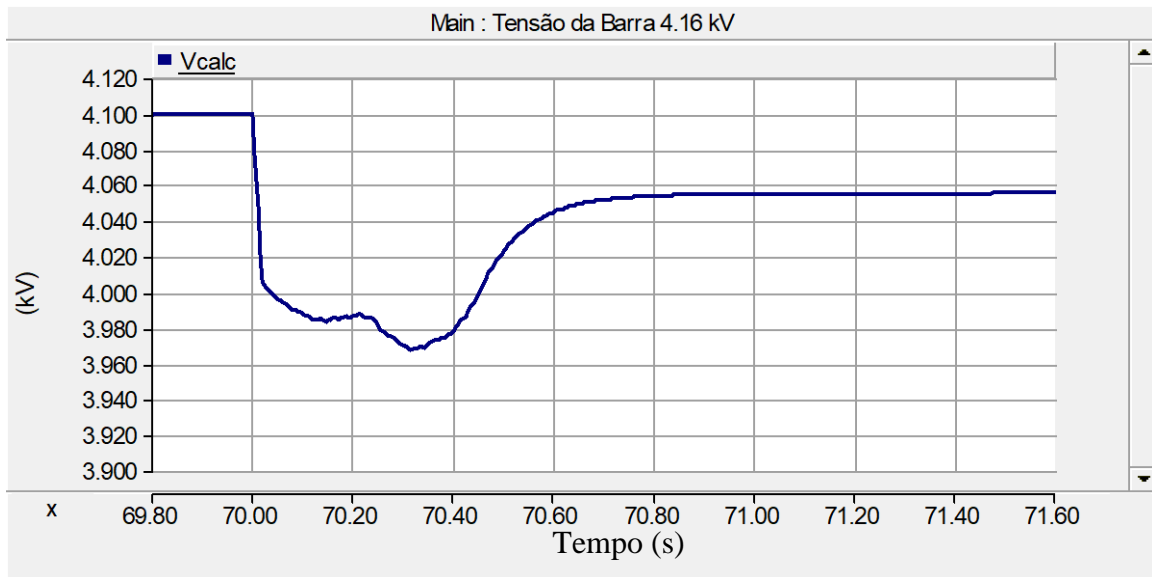


Figura 78 - Afundamento de tensão na barra 4,16 kV ação combinada.

Na análise comparativa entre os afundamentos de tensão da barra de 4,16 kV apresentado nas Figuras 77 e 78, pôde ser observado uma redução de 10% no afundamento de tensão da barra, porém o tempo do afundamento aumentou em 220 ms.

Com a análise pode-se observar uma melhoria no perfil de tensão da barra durante a partida da máquina com a implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência, entretanto ainda se faz necessário a operação do comutador de *tap* para a regulação da tensão da barra em 0,0123 pu durante o tempo de simulação. Um ponto a ser destacado, é que a operação do comutador de *tap*, não tem relação com a implementação da ação combinada, e sim com a variação do perfil de carga na barra em regime. Esta comutação do *tap* pode ser observada na Figura 79, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa o posicionamento do *tap* do transformador, obtida do software PSCAD/EMTDC.

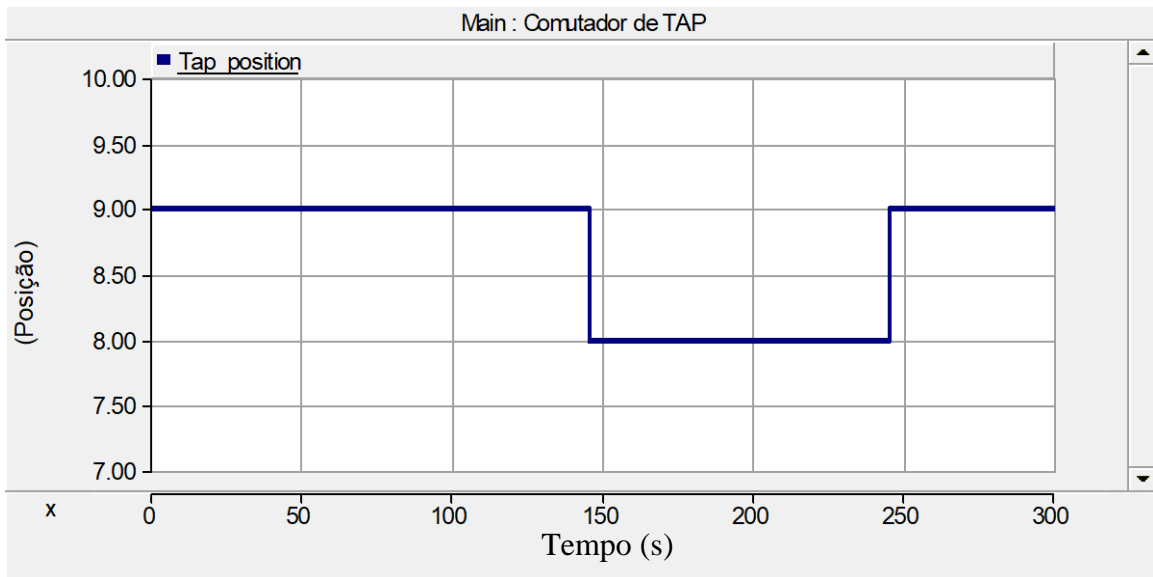


Figura 79 - Comutação do *tap* transformador na barra com ação combinada.

As Figuras 80 e 81, foram obtidas do *software* PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de corrente do motor para o caso base e aplicação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a corrente em kA, obtidos durante o período de simulação.

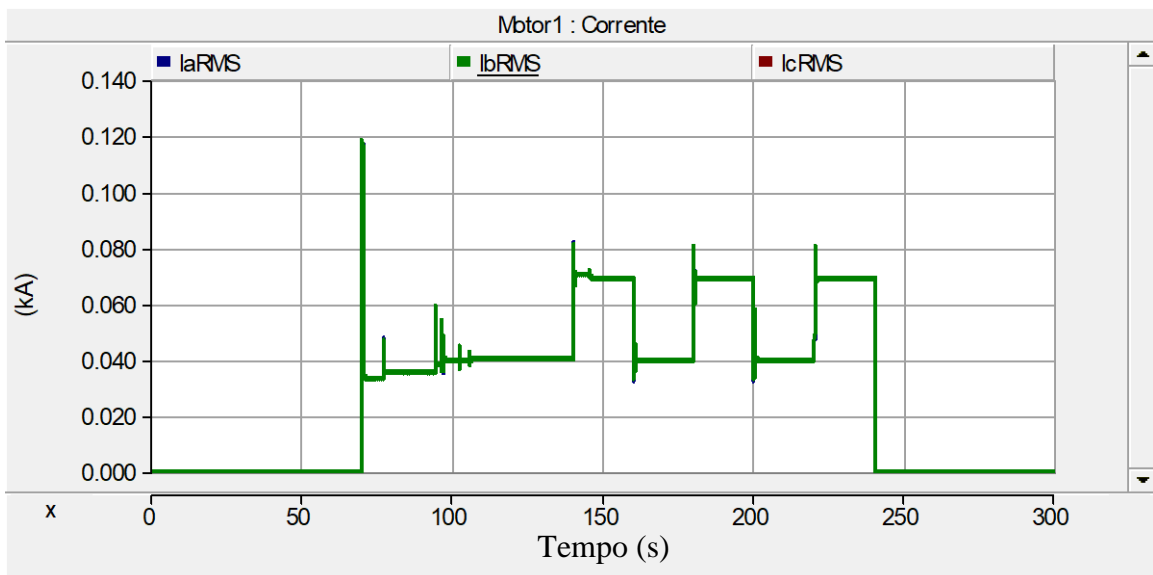


Figura 80 - Perfil de corrente do motor caso base.

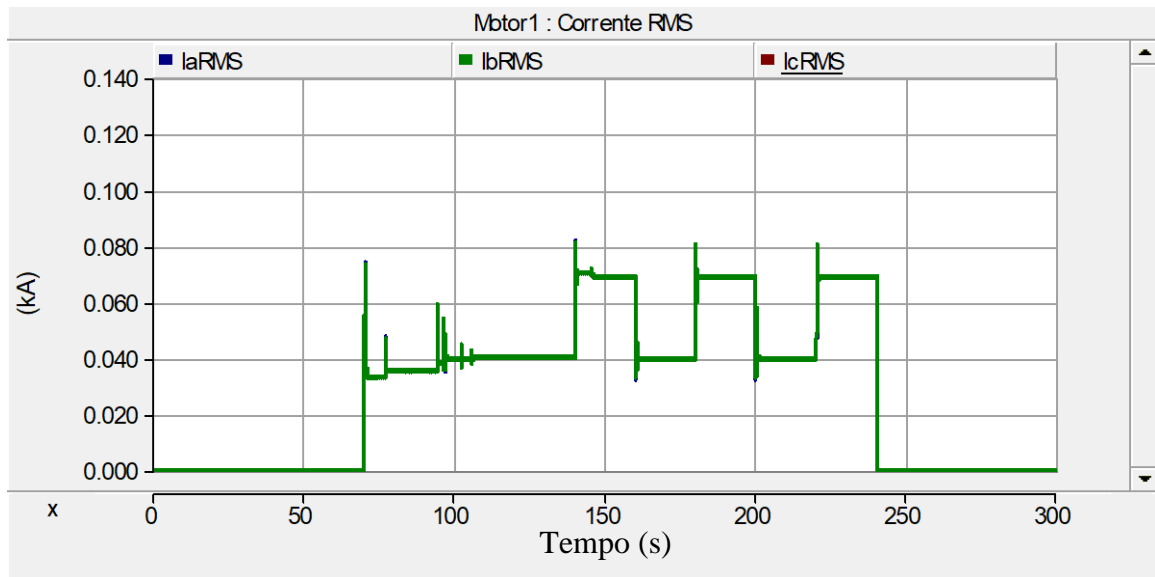


Figura 81 - Perfil de corrente do motor com ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência.

Na análise comparativa dos perfis de corrente do motor apresentado nas Figuras 80 e 81, pôde ser observado que a implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência na barra, também apresenta uma redução considerável de 37,9% do pico de corrente durante a partida do motor, porém os demais eventos do perfil de corrente observado na aplicação da ação combinada e caso base são similares.

As Figuras 82 e 83, apresentam a rampa de aceleração do motor com aplicação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência e do caso base, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação.

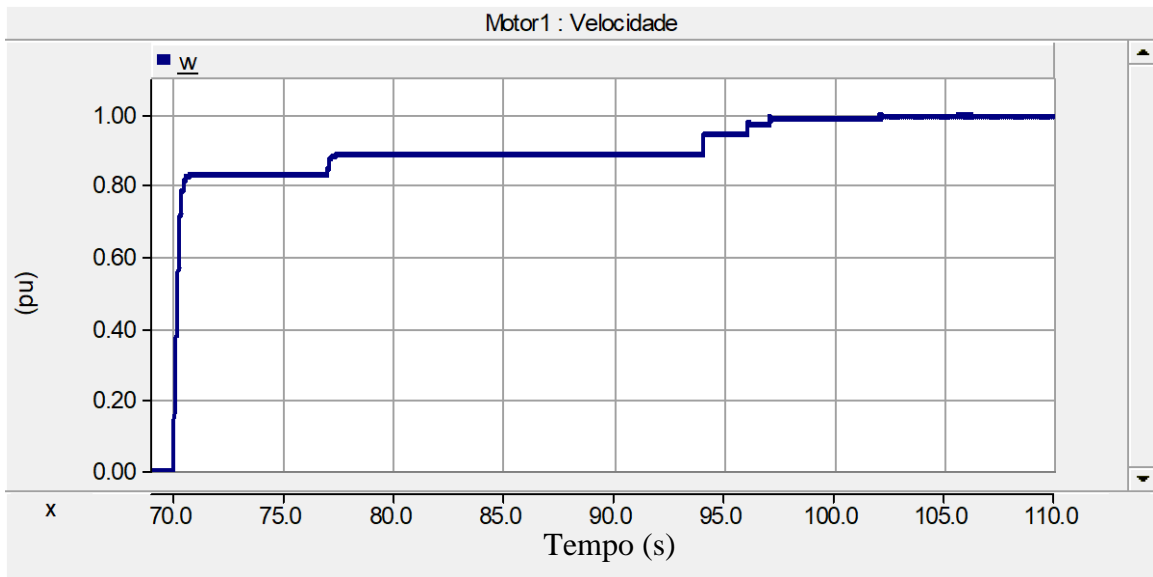


Figura 82 - Rampa de aceleração no caso base.

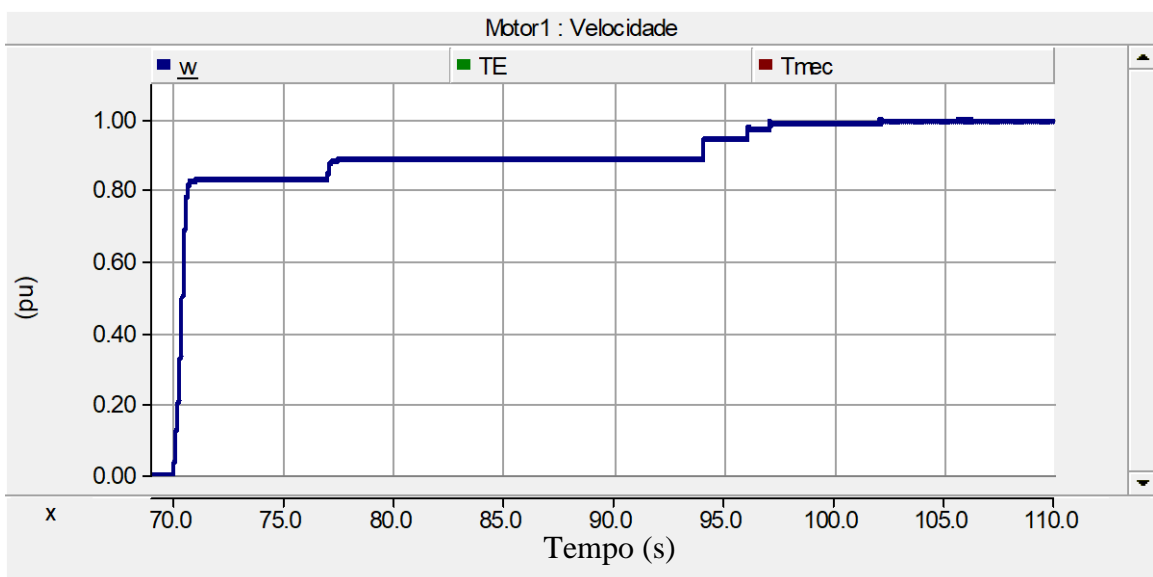


Figura 83 - Rampa de aceleração do motor com ação combinada.

Para uma análise mais detalhada, foi aplicado um *zoom* na rampa de aceleração do caso base e ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência apresentado nas Figuras 84 e 85, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a velocidade em pu, obtidos do *software* PSCAD/EMTDC durante o período de simulação.



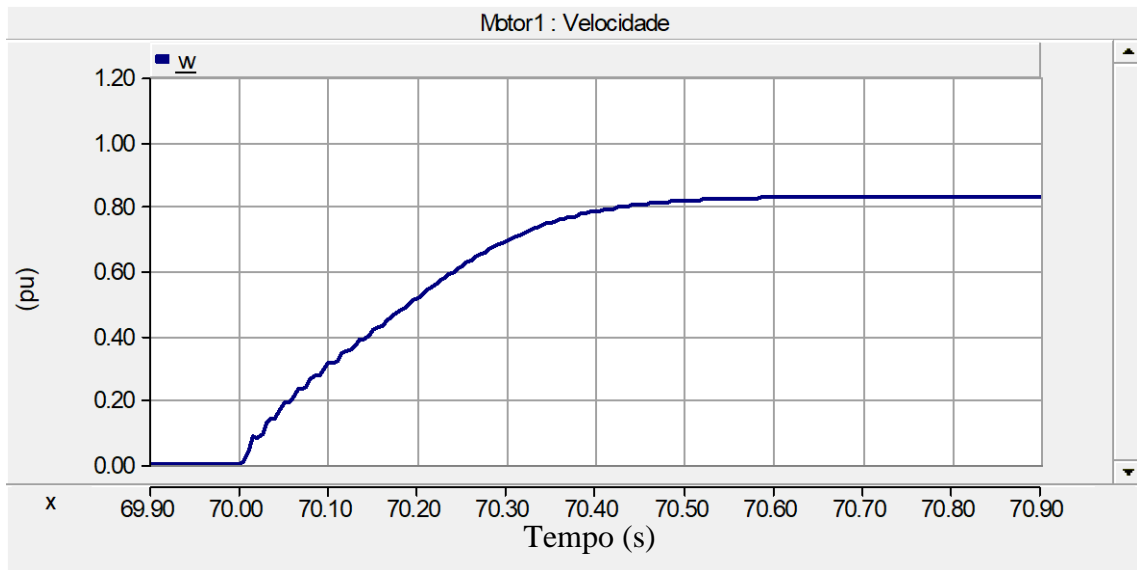


Figura 84 - Zoom na rampa de aceleração do motor no caso base.

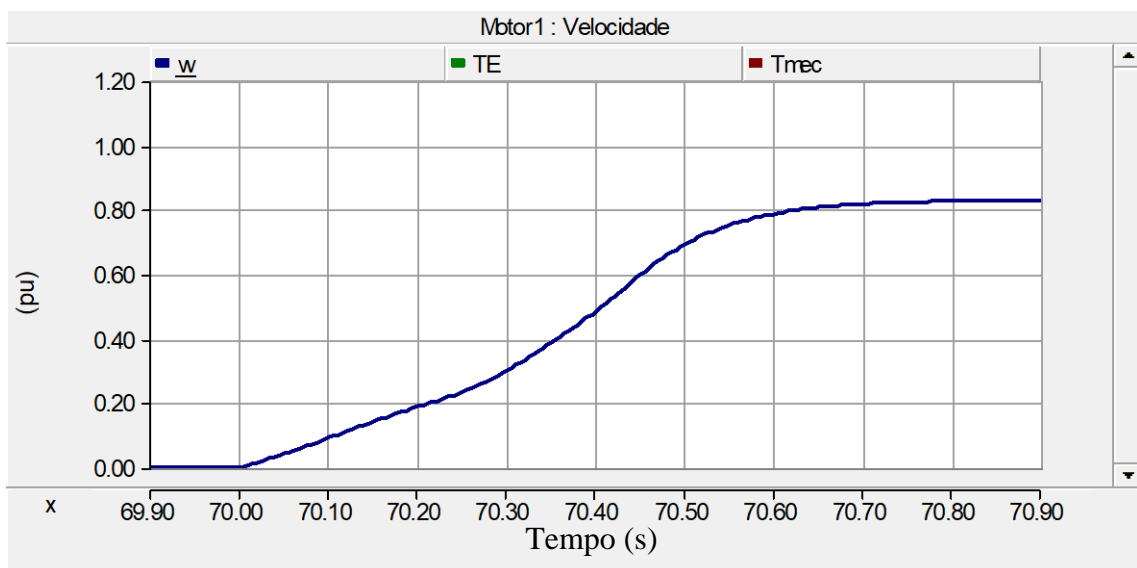


Figura 85 - Zoom na rampa de aceleração do motor com ação combinada.

Na análise comparativa das Figuras 84 e 85, pode ser observado que a implementação da ação combinada ocasiona um pequeno atraso de 190 ms no tempo de partida da máquina até o atingimento de 80% da velocidade nominal, portanto, suavizando a partida do motor.

A implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência na barra de 4,16 kV, apresentou um bom resultado com a redução da variação de tensão de curta duração da barra e a redução do pico de corrente do motor na partida, sem detrimento significativo da rampa de aceleração da máquina. Porém, a aplicação desta solução não resolveu o problema de regulação de tensão da barra em regime permanente. Será necessário investigar outra solução combinada que possa solucionar tecnicamente este problema.

## 5.2 APLICAÇÃO DO STATCOM IDEAL

A avaliação dos resultados da aplicação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência na barra de 4,16 kV, apresentou um bom desempenho conforme apresentado no item 5.1.5. Porém, neste item será realizada a análise da aplicação do STATCOM ideal para solucionar os problemas de regulação de tensão da barra em regime permanente. O STATCOM ideal implementado na modelagem é de controle por fonte de corrente, onde o diagrama de controle é apresentado na Figura 86.

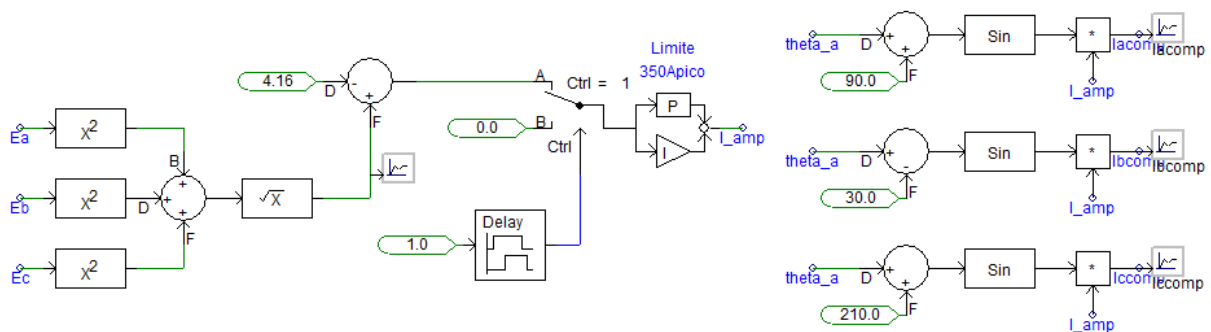


Figura 86 - Diagrama de controle do STATCOM modelado.

Na metodologia utilizada para essa análise foi realizada a modelagem do MITRB mantendo a inserção do banco de resistência conforme apresentado no caso base e conectando o STATCOM ideal na barra de 4,16 kV. A Figura 87 apresenta a modelagem do sistema com STATCOM ideal conectado.

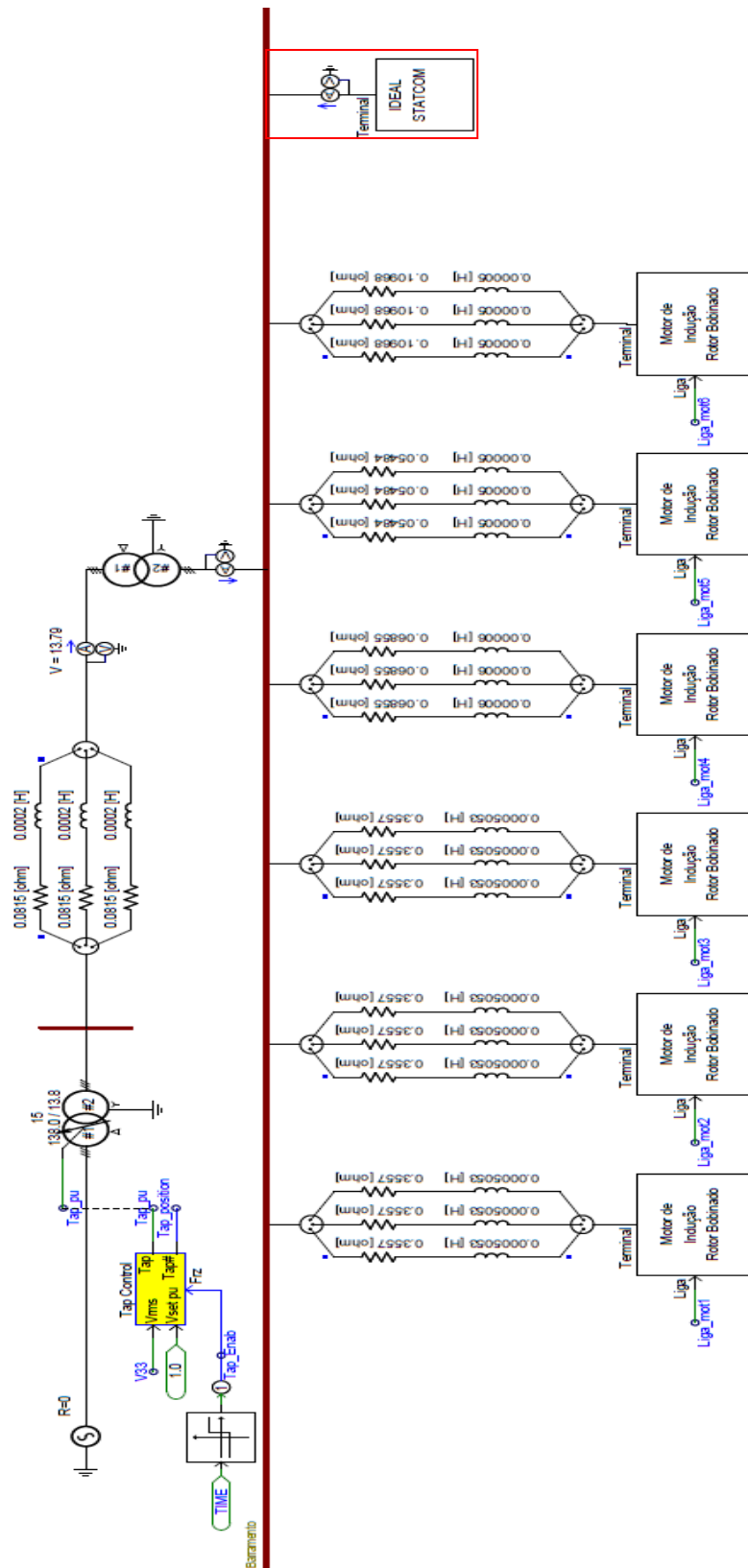


Figura 87 - Modelagem do sistema com STATCOM ideal.

As Figuras 88 e 89, foram obtidas do *software* PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de tensão da barra de 4,16 kV do caso base com partida rotórica e com a implementação do STATCOM ideal, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a tensão em kV.

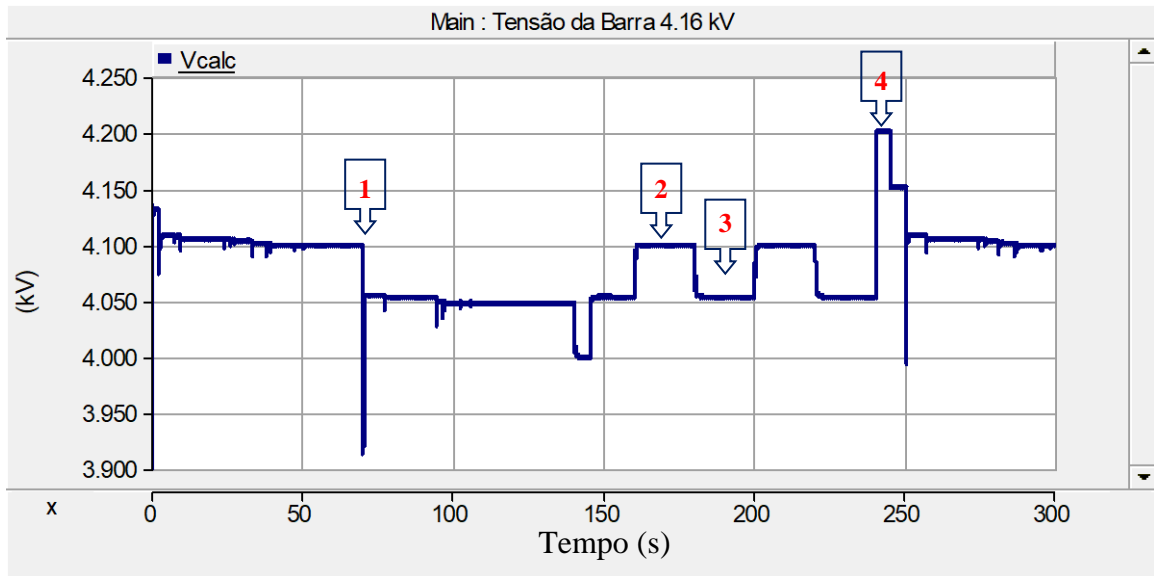


Figura 88 - Perfil de tensão da barra de 4,16 kV com partida rotórica.

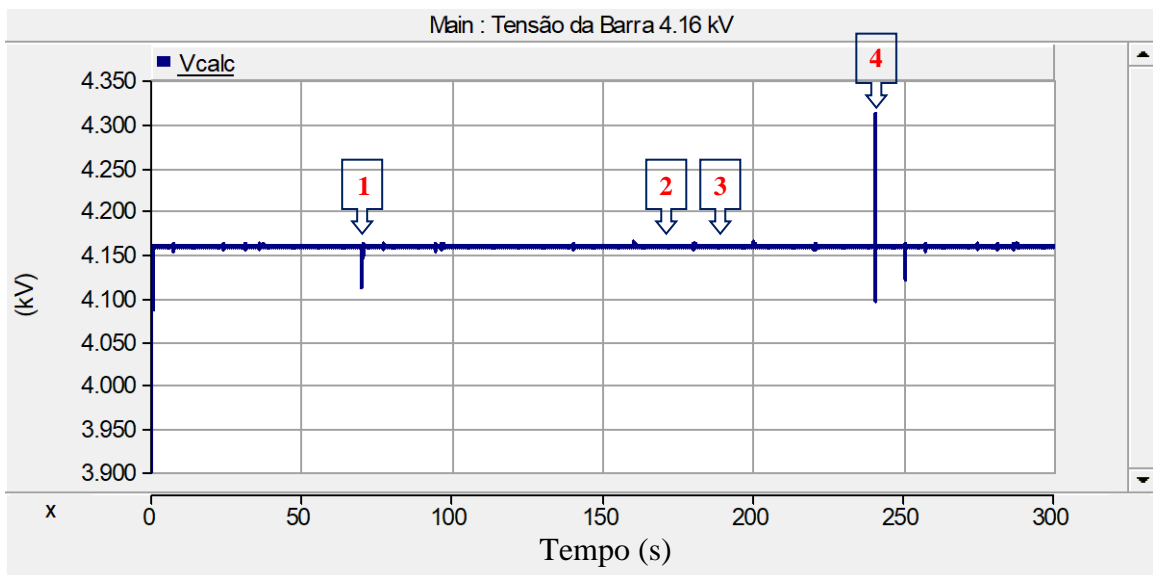


Figura 89 - Perfil de tensão da barra de 4,16 kV com STATCOM ideal.

Na análise do evento 1, conforme destacado nas Figuras 88 e 89, pode ser observada uma redução considerável no afundamento de tensão com a aplicação do STATCOM ideal em comparação com o caso base.

Os eventos 2 e 3 também apresentaram uma melhoria significativa em relação à regulação de tensão na barra com a implementação do STATCOM ideal, pois a variação de carga nos motores não ocasionou a variação da tensão da barra, ao contrário dos resultados obtidos no caso base conforme apresentado na Figura 88.

O evento 4 é ocasionado pelo desligamento abrupto dos motores da barra, onde foi possível observar que mesmo com a aplicação do STATCOM ideal não foi possível mitigar este distúrbio. Para uma melhor visualização, foi aplicado um *zoom* neste evento no perfil de tensão da barra de 4,16 kV, onde é possível observar uma oscilação de tensão durante o tempo de 40 ms, conforme apresentado na Figura 90.

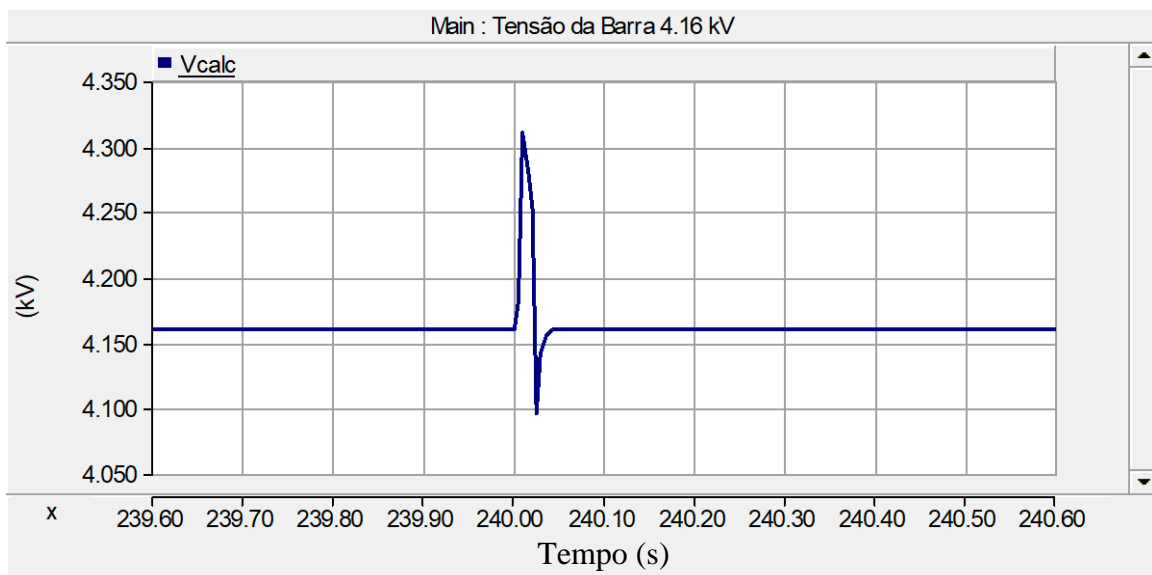


Figura 90 - Oscilação de tensão da barra de 4,16 kV saída abrupta dos motores.

A Figura 91, apresenta a operação do STATCOM ideal para regulação de tensão da barra de 4,16 kV em regime permanente, onde pode ser observado a compensação do reativo durante o período de funcionamento dos motores conectados na barra.

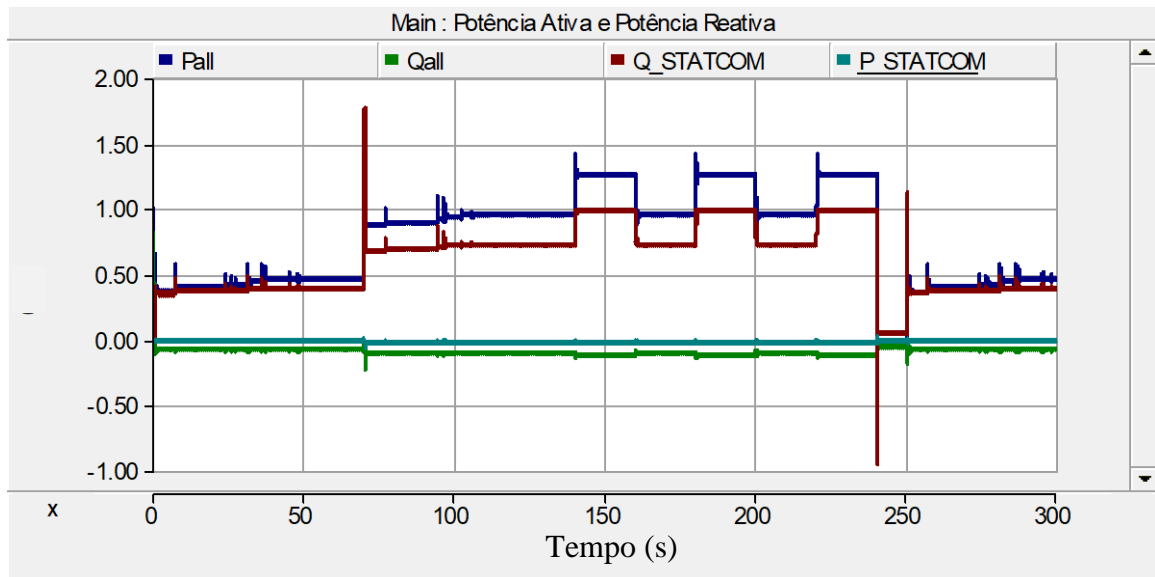


Figura 91 - Operação do STATCOM ideal.

Com a aplicação do STATCOM ideal, pode-se observar uma melhoria significativa na regulação de tensão da barra de 4,16 kV, onde não foi necessário a operação do comutador de *tap* para a regulação da tensão da barra durante o tempo de simulação, diferentemente do caso base, onde se faz necessário a operação do comutador. As Figuras 92 e 93, apresentam o comutador de *tap* sem operação com a implementação do STATCOM ideal e a comutação do *tap* no caso base, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa o posicionamento do *tap* do transformador, obtida do software PSCAD/EMTDC.

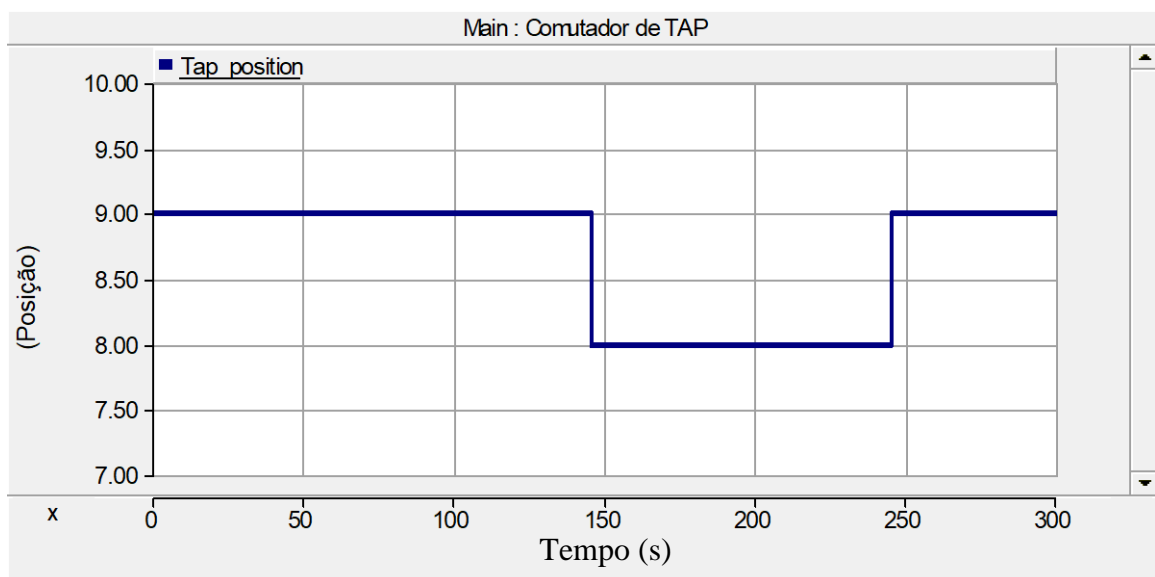


Figura 92 - Operação do comutador de *tap* no caso base.

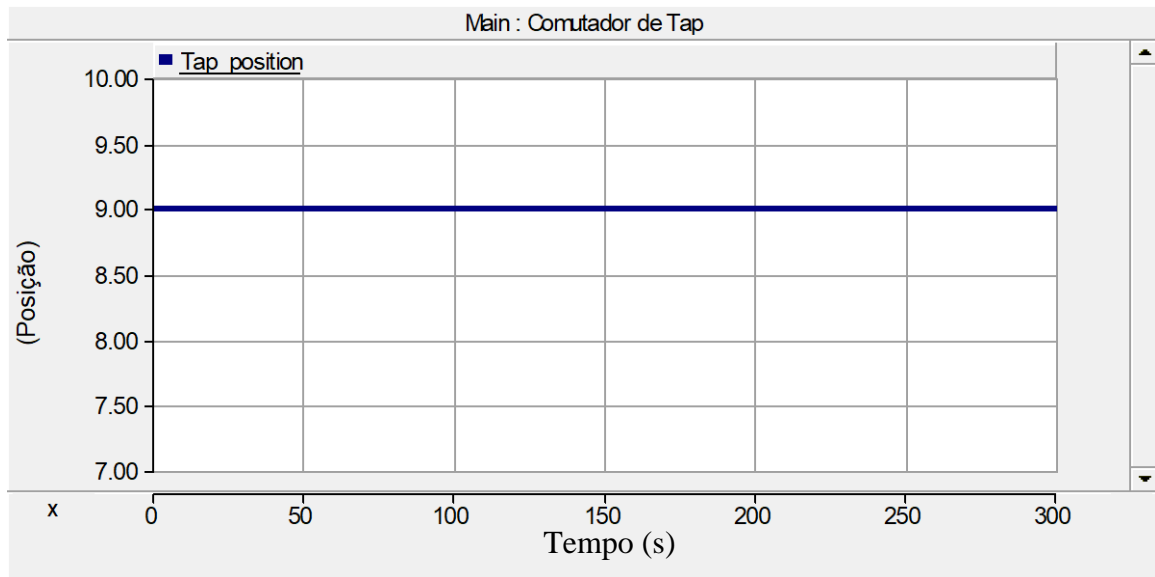


Figura 93 - Operação do comutador de *tap* com implementação do STATCOM ideal.

As Figuras 94 e 95, foram obtidas do *software* PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de corrente do motor para o caso base e aplicação do STATCOM ideal, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a corrente em kA, obtidos durante o período de simulação.

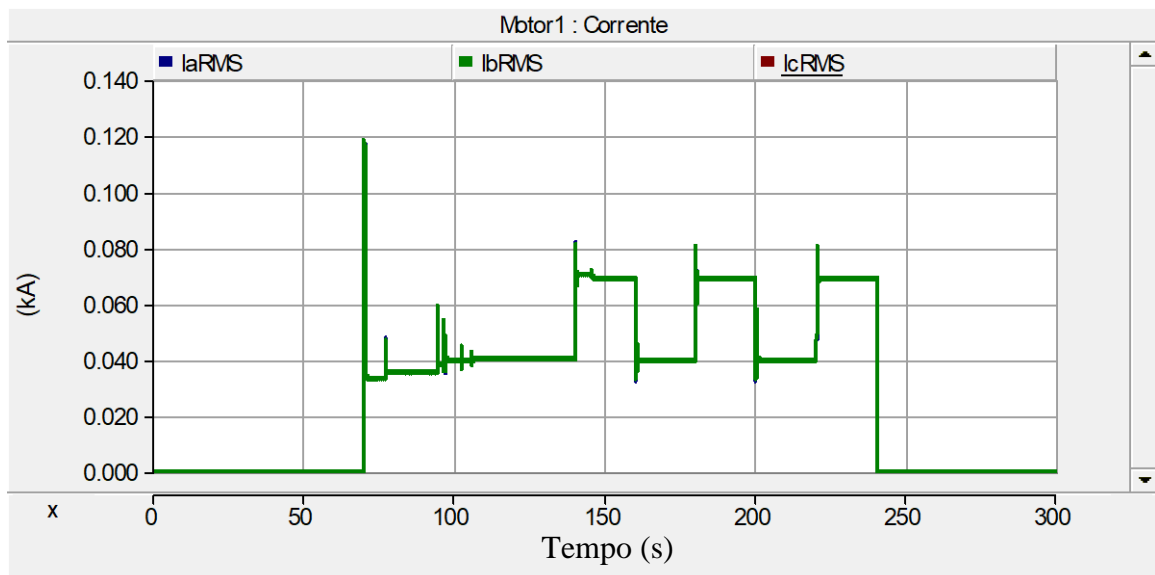


Figura 94 - Perfil de corrente do motor caso base.

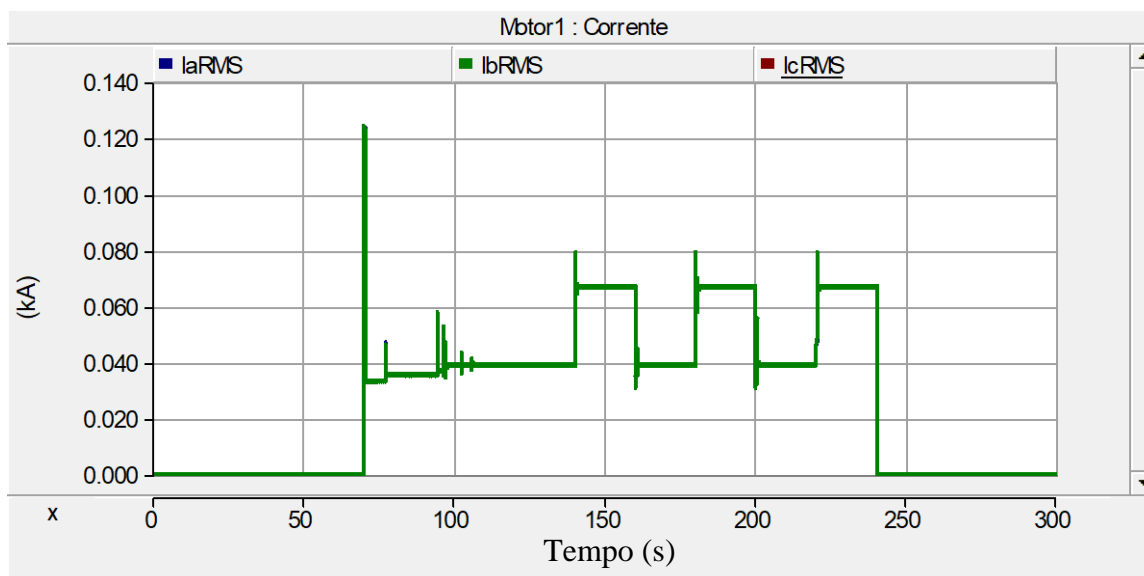


Figura 95 - Perfil de corrente do motor com implementação do STATCOM ideal.

Na análise comparativa dos perfis de corrente do motor apresentado nas Figuras 94 e 95, pôde ser observado que a implementação do STATCOM ideal, apresenta um pico de corrente de 4,84% superior ao do caso base durante a partida do motor, porém os demais eventos do perfil de corrente observado na aplicação do STATCOM e caso base são similares.

A implementação do STATCOM ideal, apresentou um resultado satisfatório com a regulação de tensão da barra em regime permanente, porém para eventos de desligamentos abruptos, o mesmo não consegue eliminar os afundamentos de tensão devido seu controle ser realizado por fonte de corrente, onde a injeção de reativo só é realizada quando o sistema detecta o afundamento.

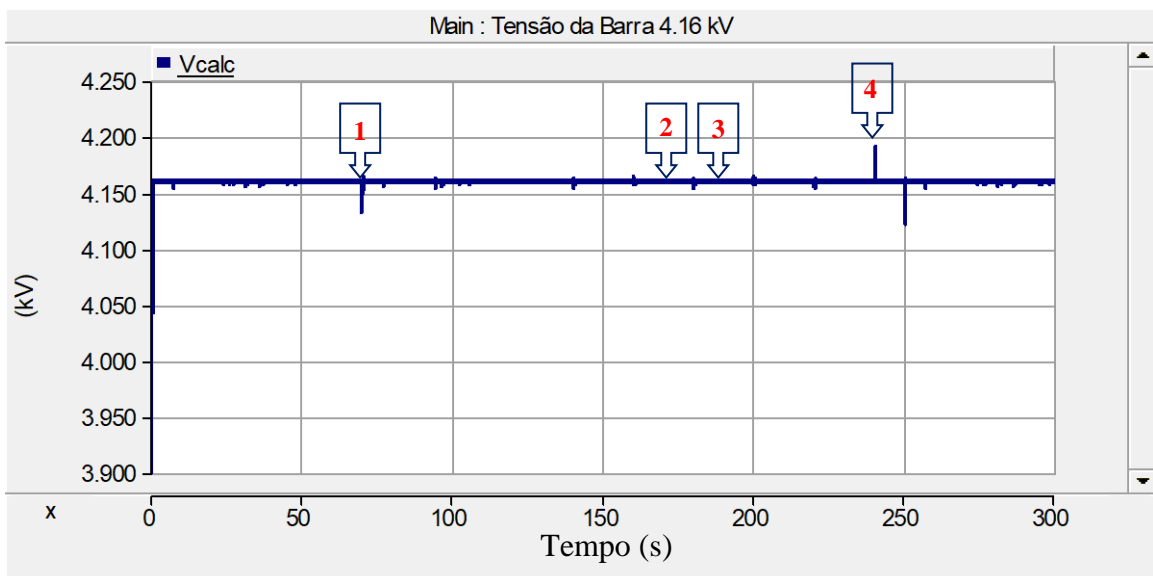
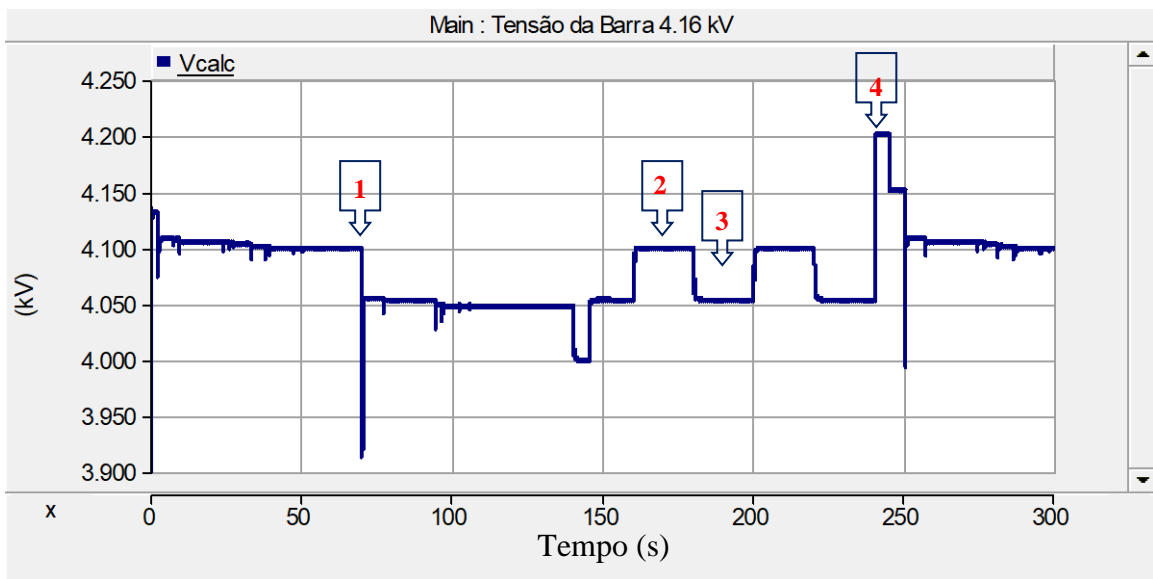
### 5.2.1 APLICAÇÃO DA AÇÃO COMBINADA DO STATCOM, *SOFT-STARTER* E BANCO DE RESISTÊNCIA

A avaliação dos resultados da aplicação do STATCOM ideal na barra de 4,16 kV, apresentou um bom desempenho conforme apresentado no item 5.2. Neste item será realizado a análise da aplicação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência para solucionar os problemas de regulação de tensão da barra em regime permanente. O STATCOM ideal implementado na modelagem é de controle por fonte de corrente.



Na metodologia utilizada para essa análise foi realizada a modelagem do MITRB mantendo a configuração do banco de resistência, *soft-starter* e conectando o STATCOM ideal na barra de 4,16 kV.

As Figuras 96 e 97, foram obtidas do *software* PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de tensão da barra de 4,16 kV do caso base com partida rotórica e com a implementação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a tensão em kV.



Na análise do evento 1, conforme destacado nas Figuras 96 e 97, pode ser observado uma redução considerável no afundamento de tensão ocasionado pela partida do motor com a aplicação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência em comparativo com o caso base. O afundamento de tensão apresentado na Figura 97, foi de aproximadamente 0,3% da tensão de referência.

Os eventos 2 e 3 também apresentaram uma melhoria significativa em relação a regulação de tensão na barra com a implementação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, pois a variação de carga nos motores não ocasionaram a variação da tensão da barra, ao contrário dos resultados obtidos no caso base conforme apresentado na Figura 96.

O evento 4 é ocasionado pelo desligamento abrupto dos motores da barra, onde foi possível observar que mesmo com a aplicação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, não foi possível mitigar este distúrbio. Para uma melhor visualização, foi aplicado um *zoom* neste evento no perfil de tensão da barra de 4.16 kV, onde é possível observar um pico de tensão durante o tempo de 43 ms, conforme apresentado na Figura 98.

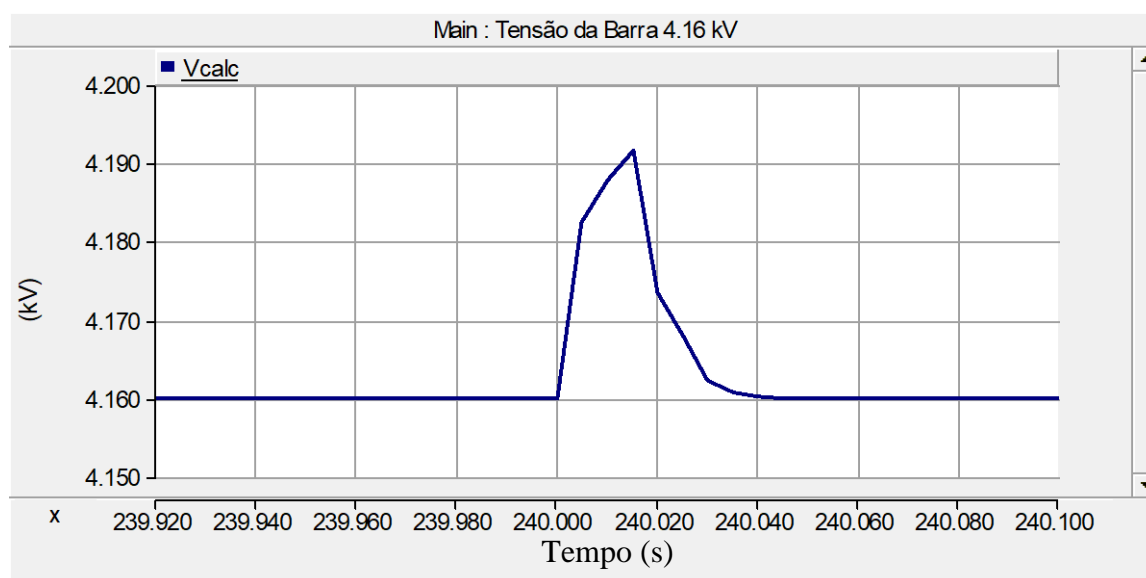


Figura 98 - Oscilação de tensão da barra de 4.16 kV saída abrupta dos motores com ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência.

Com a aplicação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, pode-se observar uma melhora significativa na regulação de tensão da barra de 4.16 kV, onde não foi necessário a operação do comutador de *tap* para a regulação da tensão da barra

durante o tempo de simulação, diferentemente do caso base, onde se faz necessário a operação do comutador. Um ponto a ser destacado é a diferença do perfil de tensão entre a ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência e a implementação do STATCOM ideal, onde no caso da ação combinada, foi necessário efetuar ajuste do ganho do STATCOM para eliminar as oscilações de tensão da barra durante a partida dos motores com o *soft-starter*.

As Figuras 99 e 100, apresentam a comutação do *tap* no caso base e o comutador de *tap* sem operação com a implementação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa o posicionamento do *tap* do transformador, obtida do software PSCAD/EMTDC.

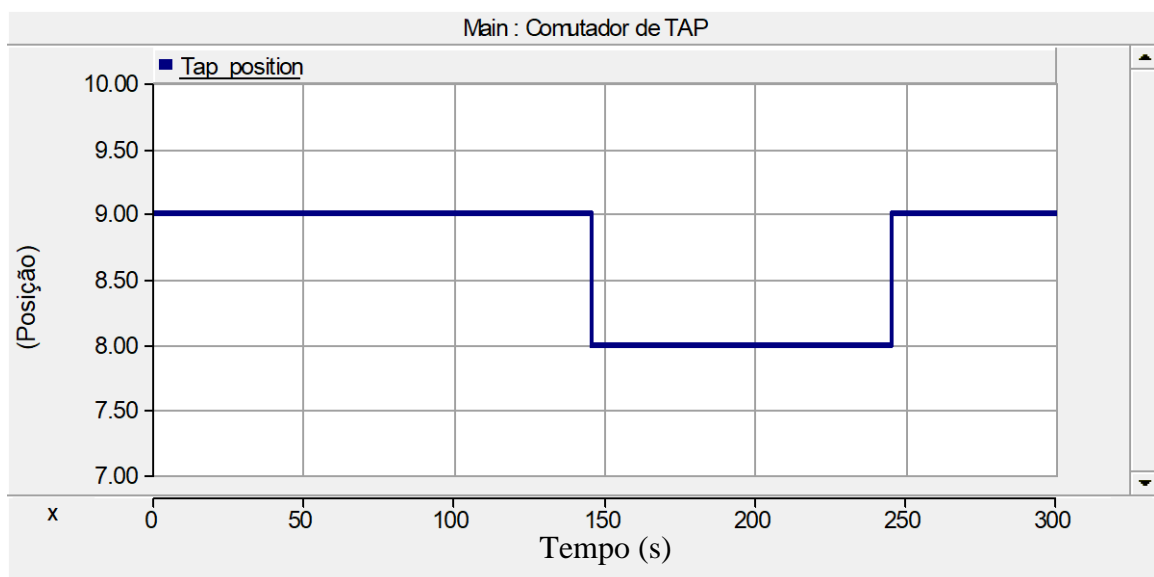


Figura 99 - Operação do comutador de *tap* no caso base.

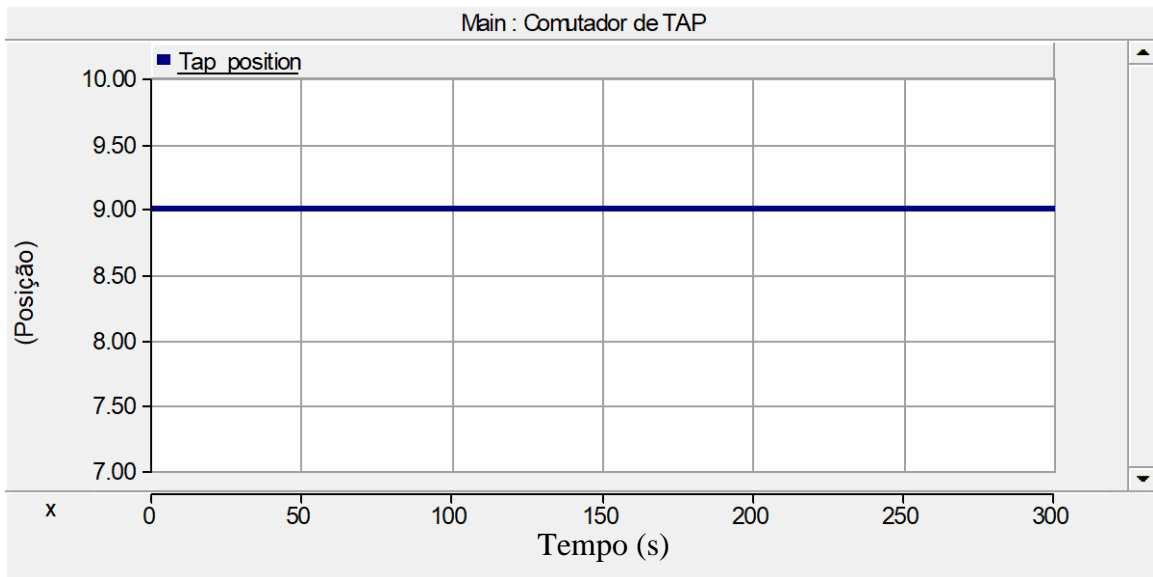


Figura 100 - Operação do comutador de *tap* com implementação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência.

As Figuras 101 e 102, foram obtidas do *software* PSCAD/EMTDC e apresentam o perfil de corrente do motor no caso base e com a aplicação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, respectivamente, onde o eixo X representa o tempo em s, e o eixo Y representa a corrente em kA, obtidos durante o período de simulação.

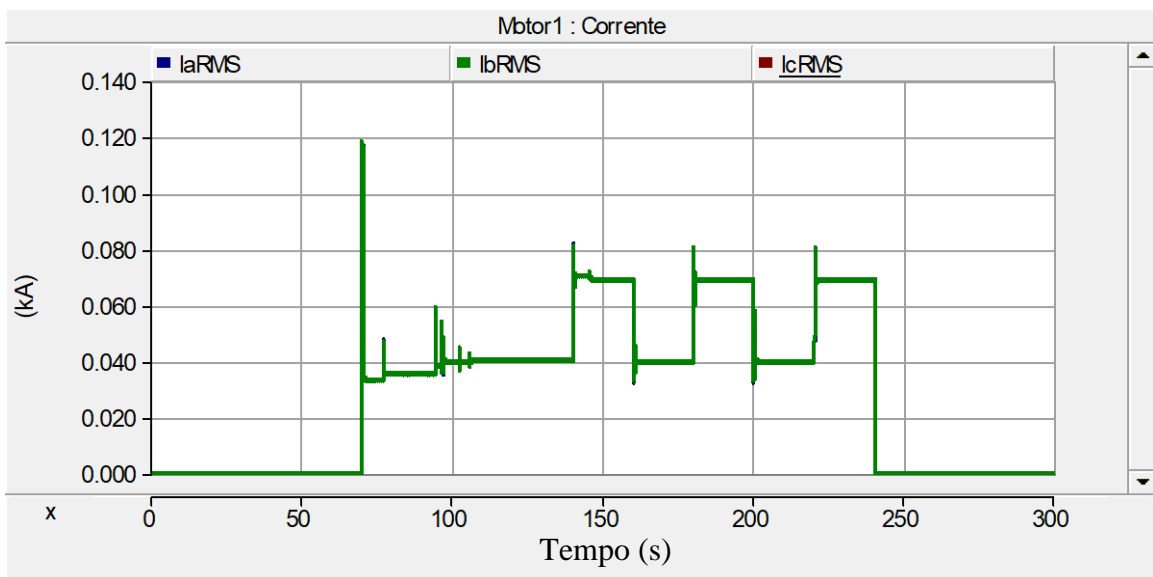


Figura 101 - Perfil de corrente do motor caso base.

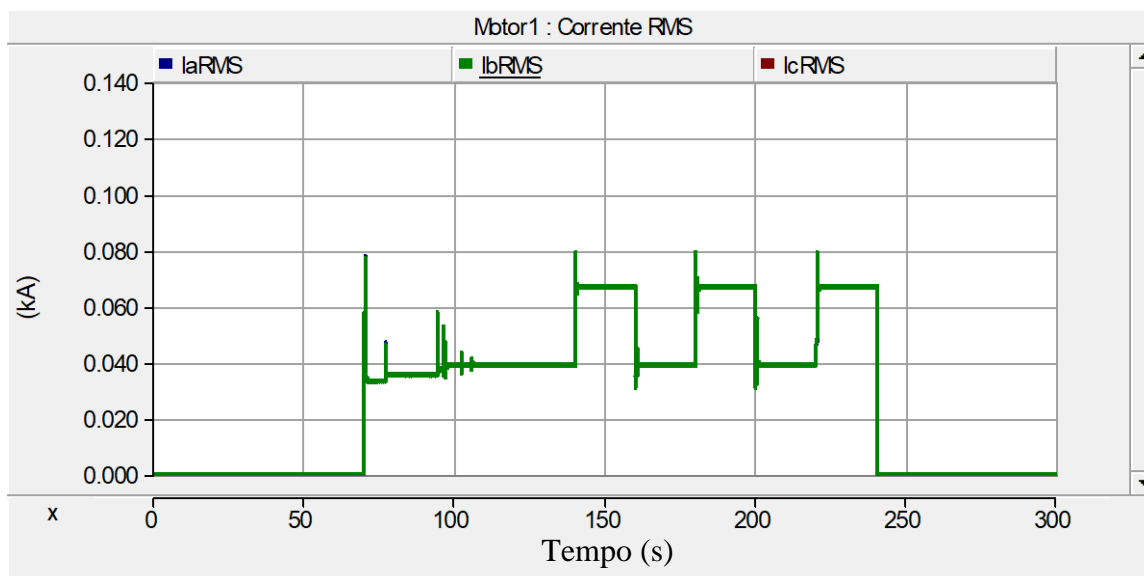


Figura 102 - Perfil de corrente do motor com implementação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência.

Na análise comparativa dos perfis de corrente do motor apresentado nas Figuras 101 e 102, pôde ser observado que a implementação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, apresenta uma redução pico de corrente de 34,84% na partida e em regime, comparando-se ao caso base.

A implementação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, apresentou um ótimo resultado com a regulação de tensão da barra em regime permanente, porém para eventos de desligamentos abruptos, o mesmo não consegue eliminar os picos de tensão devido seu controle ser realizado por fonte de corrente, onde a injeção de reativo só é realizada quando o sistema detecta o distúrbio.

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise da viabilidade técnica para substituição da técnica de acionamento de um transportador de correia existente, pela técnica mais moderna de acionamento através de um *soft-starter*, com enfoque no impacto na qualidade da energia durante o seu acionamento. Além disso, avaliou-se o benefício da implementação de um compensador estático (STATCOM) como forma de regulação da tensão da barra de alimentação do transportador. As avaliações técnicas foram realizadas através da modelagem e simulação do sistema alimentador do transportador no *software* de simulações de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

A comparação dos resultados de simulação com as oscilografias realizadas mostra que o perfil de resposta do sistema simulado condiz com o perfil apresentado nas oscilografias. É importante ressaltar que os dados disponíveis têm intervalo de amostragem de 10 segundos e, portanto, não permitem uma comparação do modelo com a planta para fenômenos de curta duração. Porém, dado que foi feito o uso dos parâmetros de projeto utilizados na modelagem do sistema e a sua validação na análise de fenômenos de média e longa duração, será considerado o modelo satisfatório também para a abordagem em análises de fenômenos de curta duração.

A validação do modelo foi realizada com base nas medições em regime permanente com tomada de dados a cada 10 segundos. O uso dos parâmetros de projeto real utilizados na modelagem do sistema e a sua validação comparativa com as oscilografias possibilitaram a validação da modelagem para avaliar fenômenos de média e longa duração. Dado a impossibilidade da continuidade da realização de novas medições onde seriam verificados os VTCDs, considerou-se o modelo usual também para fenômenos de curta duração.

Os resultados observados com a implementação do *soft-starter* exclusivamente conectado para partida do motor, não foram suficientes para vencer o torque de partida da máquina, onde ficou caracterizada a inviabilidade da aplicação deste técnica de acionamento exclusiva para cargas com altas inércias e conjugado constante. Diante deste cenário, foi realizado uma nova análise implementando a ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência em 3 níveis de carga, onde foi constatado individualmente que houve uma redução

da corrente de pico durante a partida, sem alterar o torque de partida e tempo de aceleração da máquina.

Os resultados obtidos com a implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência na barra de 4,16 kV, foram satisfatório, onde apresentou um bom resultado com a redução do afundamento de tensão da barra e a redução do pico de corrente do motor na partida, sem detrimento da rampa de aceleração da máquina. Porém, a aplicação desta solução não resolveu o problema de regulação de tensão da barra em regime permanente. Foi necessário investigar outra solução combinada que pudesse solucionar tecnicamente este problema, onde o STATCOM ideal foi vislumbrado para tal solução.

A implementação do STATCOM ideal apresentou um ótimo resultado com a regulação de tensão da barra em regime permanente, sem operação do comutador de *tap* do transformador principal. Porém, para eventos de desligamentos abruptos, o mesmo não consegue eliminar os afundamentos de tensão. Isso é devido ao seu controle ser realizado por fonte de corrente, onde a injeção de reativo só é realizada quando o sistema detecta o afundamento.

Os resultados alcançados com a implementação da ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência, também apresentaram um resultado satisfatório com a regulação de tensão da barra em regime permanente, redução do pico de corrente durante a partida sem o detrimento do torque de partida e da rampa de aceleração. Porém, para os eventos de desligamentos abruptos, o mesmo não conseguiu eliminar os picos de tensão da barra.

Por fim, pode-se concluir que a implementação da ação combinada do *soft-starter* e banco de resistência, STATCOM ideal e a ação combinada do STATCOM ideal, *soft-starter* e banco de resistência trariam um bom resultado para mitigação dos problemas de QEE no sistema estudado.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, vislumbra-se a implementação da rampa de desaceleração através do *soft-starter* para eliminação dos picos de tensão na barra ocasionados pelo desligamento abrupto dos transportadores. Outra perspectiva seria avaliação da implementação do STATCOM como fonte de controle de tensão, para mitigar os problemas de regulação de tensão na barra em regime permanente e, por fim, a avaliação da implementação do inversor de

frequência nos acionamentos dos transportadores de correia para mitigar os problemas de QEE durante a partida e em regime. Outros trabalhos a serem avaliados também incluem a extensão desta pesquisa a acionamentos de outras cargas críticas, como sistemas de exaustão de alta potência, sistemas de compressão, entre outros. Outros processos relacionados a avaliação e indicação de limites para cada modelo de acionamento (técnicas combinadas) podem ser analisados.



**BIBLIOGRAFIA**

- [1] GUERRA, L. C. B.; SILVA, S. C. A. Análise do processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro. *Empírica BR-Revista Brasileira de Gestão, Negócio e Tecnologia da Informação*, 1.1: 39-55, 2017.
- [2] BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/LEIS\\_2001/L10295.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LEIS_2001/L10295.htm)> Acesso em: 12/11/18.
- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2018: ano base 2017. Ministério de Minas e Energia (MME), Rio de Janeiro: EPE, 2018.
- [4] SA, ELETROBRAS-Centrals Elétricas Brasileiras. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso: ano-base 2005, classe industrial. Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2008.
- [5] KRAUSE, C. B. et al. Manual de prédios eficientes em energia elétrica. Rio de Janeiro: IBAM/ELETROBRÁS/PROCEL, 2002.
- [6] ZHANG, S.; XIA, X.; Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. *Applied Energy*, v. 88, n. 9, p. 3061-3071, 2011.
- [7] HALEPOTO, I. A.; KHASKHELI, S. Modeling of an integrated energy efficient conveyor system model using belt loading dynamics. *Indian J. Sci. Technol*, 9: 47, 2016.
- [8] ALSPAUGH, M. A. Latest developments in belt conveyor technology. *Proc. of MINExpo*, v. 2004, 2004.
- [9] NEVELSTEEN J.; ARAGON H. Starting of large motors methods and economics. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, no. 6, pp. 1012–1018, Nov./Dec. 1989.
- [10] ZENGINOBUZ, G. et al. Performance optimization of induction motors during voltage-controlled soft starting. *IEEE transactions on energy conversion*, v. 19, n. 2, p. 278-288, 2004.
- [11] PATIL, L. S.; THOSAR, A. G. Application of D-STATCOM to mitigate voltage sag due to DOL starting of three phase induction motor. In: 2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation. IEEE, 2009. p. 1-4.
- [12] PROCEL. Conservação de Energia. 3ª Edição. Itajubá, 2006.
- [13] WEG. Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção. 2015.

- [14] WEG. Módulo 2 – Variação de velocidade. 2013
- [15] BORTONI, E. C. et al. Evaluation of manufacturers strategies to obtain high-efficient induction motors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 31, p. 221-227, 2019.
- [16] KOSOW, I. L.; Máquinas elétrica e transformadores. São Paulo: Globo, 2005.
- [17] ANDRADE, C. T. C. Análise de métodos para determinação da eficiência de motores trifásicos de indução. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2009
- [18] GUIMARÃES, R. et al. Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2008.
- [19] OLIVEIRA, L. F. C. A influência dos tirantes de fixação do estator nas perdas das máquinas de indução trifásicas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2013.
- [20] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; KUSKO, A. Maquinas eletricas: conversão eletromecânica da energia processos, dispositivos e sistemas. McGraw-Hill, 1975.
- [21] MOREIRA, A. B. Análise da operação de sistemas de ventilação industrial visando a Eficiência Energética. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2006.
- [22] DEMS, M.; KOMEZA, K.; LECOINTE, J.-Ph. Variation of additional losses at no-load and full-load for a wide range of rated power induction motors. *Electric Power Systems Research*, v. 143, p. 692-702, 2017.
- [23] ADEKITAN, A. I.; SAMUEL, I. A.; AMUTA, E. Dataset on the performance of a three-phase induction motor under balanced and unbalanced supply voltage conditions. *Data in brief*, v. 24, 2019.
- [24] PRYYMAK, B.; MORENO-EGUILAZ, J. M.; PERACAULA, Juan. Neural network flux optimization using a model of losses in induction motor drives. *Mathematics and computers in simulation*, v. 71, n. 4-6, p. 290-298, 2006.
- [25] CHIOVATTO, C. Metodologia de avaliação das condições de funcionamento dos motores de indução trifásicos sob o enfoque da eficiência energética. Dissertação mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- [26] GASTLI, Adel; AHMED, Mohamed Magdy. ANN-based soft starting of voltage-controlled-fed IM drive system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 20, n. 3, p. 497-503, 2005.
- [27] SOLVESON, M. G.; MIRAFZAL, B.; DEMERDASH, N. AO. Soft-started induction motor modeling and heating issues for different starting profiles using a

- flux linkage ABC frame of reference. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 42, n. 4, p. 973-982, 2006.
- [28] RASHID, M. H. et al. Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. Makron, 1999.
- [29] PEREIRA, A. H. Controladores de tensão CA. Disponível em: <[http://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula\\_09-ELT-313-Controladores-de-tensao-CA.pdf](http://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula_09-ELT-313-Controladores-de-tensao-CA.pdf)>. Acesso em: 17/10/19.
- [30] GASTLI, A.; AHMED, M. Magdy. ANN-based soft starting of voltage-controlled-fed IM drive system. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 20, n. 3, p. 497-503, 2005.
- [31] ROCKWELL AUTOMATION. When to use a soft starter or an AC variable frequency drive. Publication 150-WP007A-EN-P. 2014.
- [32] FERRAZ, R. Guia de aplicação de soft-starters–WEG. 2009.
- [33] CAVALIERE, C. A. C. et al. Aplicação do STATCOM na distribuição: regulação de tensão e controle de fator de potência. 2003.
- [34] HUWEG, A. F.; BASHI, S. M.; MARIUN, N. A STATCOM simulation model to improve voltage sag due to starting of high power induction motor. In: PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference, 2004. IEEE, 2004. p. 148-152.
- [35] PATIL, L. S.; THOSAR, A. G. Application of D-STATCOM to mitigate voltage sag due to DOL starting of three phase induction motor. In: 2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation. IEEE, 2009. p. 1-4.
- [36] MELIN, P. E. et al. Analysis and control strategy for a current-source based D-STATCOM towards minimum losses. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 116, p. 105532, 2020.
- [37] DUGAN, R.C., et al. Electrical Power Systems Quality, 2.ed., McGraw-Hill, 2004.
- [38] PRODIST, ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica-Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8–Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10. 2018.
- [39] DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Avaliação da qualidade da energia elétrica. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>>. Acesso em: 26/04/19.
- [40] FLUKE, Fluke. 435 Series II Power Quality and Energy Analyzer. Disponível em: <<http://en-us.fluke.com/products/power-quality-analyzers/fluke-435-ii-power-quality.html>>. Acesso em: 14/03/19.